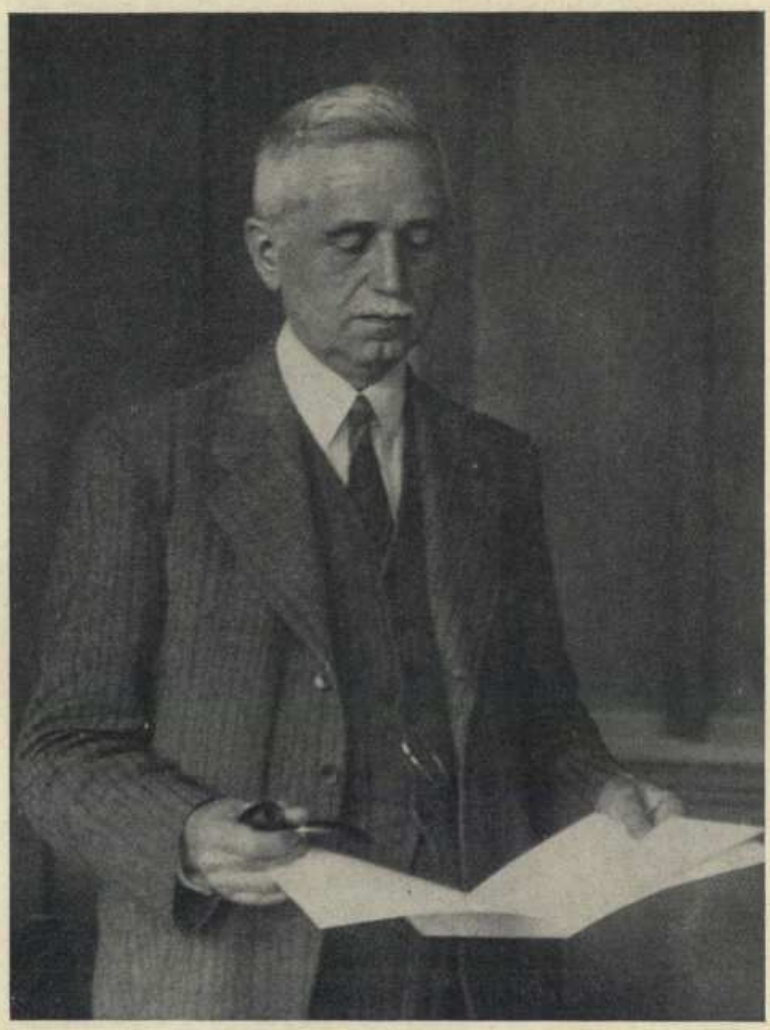
www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

9e JAARGANG No. 1, blz. 1-32 JANUARI 1947

Philips Technisch Tijdschrift

BEHANDELENDE TECHNISCHE VRAAGSTUKKEN
SAMENHANGENDE MET DE PRODUCTEN, WERKWIJZEN EN ONDERZOEKINGEN
VAN DE N.V. PHILIPS' GLOEILAMPENFABRIEKEN

REDACTIE: HET NATUURKUNDIG LABORATORIUM DER N.V. PHILIPS' GLOEILAMPENFABRIEKEN, EINDHOVEN



Den 20 October 1946 was het zestig jaren geleden, dat Ekko Oosterhuis te Zetten werd geboren. Het was dit jaar bovendien 35 jaren geleden, dat hij te Groningen promoveerde tot doctor in de Wis- en Natuurkunde. Na eenige jaren werkzaam te zijn geweest aan het Kamerlingh Onnes Laboratorium te Leiden, werd Dr. Oosterhuis in 1914 als natuurkundige verbonden aan de N.V. Philips' Gloeilampenfabrieken te Eindhoven.

De redactie van het Philips Technisch Tijdschrift stelt er prijs op, deze feiten te memoreeren, omdat Dr. Oosterhuis in haar midden reeds sedert de oprichting van dit tijdschrift in 1936 een zeer bijzondere plaats inneemt. Door zijn critische geest en zijn veelzijdige kennis weet hij de in een onderwerp schuilende problemen tot hun kern te herleiden en de meest bevattelijke wijze van behandeling er van aan te geven. Indien dit tijdschrift zich in zijn lezerskring vrienden heeft mogen verwerven, dankt het dit dan ook ongetwijfeld voor een groot deel aan de medewerking van Dr. Oosterhuis. De redactie hoopt nog vele jaren de steun van zijn bezadigd oordeel en groote werkkracht te mogen genieten.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

KLEUREN EN KLEURINDRUKKEN

door P. J. BOUMA en A. A. KRUITHOF.

535.65:535.733

Het verschil tusschen de begrippen kleurindruk en kleur wordt uiteengezet. De kleurindruk, die, behalve door de samenstelling van het licht dat van een gekleurd voorwerp ons oog bereikt, in sterke mate wordt beïnvloed door allerlei bijkomstige omstandigheden (o.a. de kleur van de omgeving en de toestand van ons oog), kunnen we karakteriseeren door zijn kleurtoon, verzadigingsindruk en helderheidsindruk. De kleur, die kan worden bepaald door een meting waarbij de invloed van die bijkomstige omstandigheden door standaardisatie practisch wordt uitgeschakeld, kunnen we vastleggen door domineerende golflengte, verzadigingsgraad en helderheid. Twee kleuren worden vergeleken door ze naast elkaar te beschouwen (simultane vergelijking). Tusschen twee kleurindrukken is uitsluitend een successieve vergelijking mogelijk, daar alleen dan de invloed van de omgeving op de aanpassingstoestand van het oog (chromatische aanpassing) geheel tot zijn recht kan komen. Deze aanpassing maakt, dat de veranderingen in kleurindruk bij overgang van een lichtsoort naar een andere veel kleiner zijn dan de verschillen in kleur onder die twee lichtsoorten — een verschijnsel dat van groote invloed is op de wijze waarop wij onze omgeving zien.

Inleiding

Het is een bekend feit, dat een wit tafellaken niet alleen bij daglicht maar ook 's avonds bij gloeilampenlicht de indruk „wit" maakt. Bij nadere beschouwing is dit feit heel merkwaardig. Immers, doen wij een proef waarbij wij een deel van het tafellaken verlichten met gloeilampenlicht en gelijktijdig een ander gedeelte met daglicht — een proef die iedereen in de huiskamer kan improviseeren —, dan zien wij het gloeilampen-gedeelte geenszins wit: het steekt duidelijk geelachtig af tegen het daglicht-gedeelte. Toch is de spectrale samenstelling van het licht, dat het tafellaken 's avonds (wanneer wij het wit noemen) naar ons oog zendt, geheel dezelfde als die van het licht, afkomstig van het met gloeilampen verlichte deel in de proef (dat wij geelachtig noemen).

Men kan dezelfde proef met gekleurde voorwerpen doen en constateert dan eveneens onverwachte kleurverschillen. Een violette japon bijv. vertoont onder de omstandigheden van de proef, daar waar er gloeilampenlicht op valt, een rose kleur. Dit behoeft op zichzelf geen verwondering te baren: de japon moet, naar gelang van de spectrale verdeeling van het er op vallende licht, ook licht met verschillende spectrale verdeeling, d.i. verschillende kleur, terugstralen. Het merkwaardige is echter wederom, dat wij de japon 's avonds, wanneer de kamer alleen met gloeilampenlicht verlicht is, geenszins rose maar toch weer violet zien.

De beschreven kleurverschillen treden in het dagelijksch leven alleen op, wanneer in een vertrek daglicht en gloeilampenlicht met ongeveer gelijke sterkte, maar van verschillende kanten invallen. Men spreekt dan van „valsch licht". Wij constateeren daarbij kleurafwijkingen (o.a. gekleurde schaduwen), die veel grooter zijn dan de kleurverschuivingen die wij bij het vervangen van daglicht door kunstlicht gewend zijn. Die kleurafwijkingen vinden we daarom vaak onverwacht en onaangenaam.

De tegenstelling tusschen de boven beschreven proeven en onze dagelijksche ervaring, waarbij wij van groote kleurverschillen niets merken, kan worden opgeheven met behulp van het inzicht, dat het begrip kleur, dat bijv. bij een technische kleurmeting te pas komt, geheel verschillend is van het begrip kleurindruk, dat slaat op de, subjectieve, gewaarwording van een waarnemer. Dat eenzelfde kleur aanleiding kan geven tot verschillende kleurindrukken, kan dan o.a. worden toegeschreven aan een verandering van het netvlies onder invloed van het licht, die aangeduid wordt met de naam „chromatische aanpassing". Dit verschijnsel heeft blijkens het bovenstaande een ingrijpende invloed op de wijze waarop wij onze omgeving zien. Het is de bedoeling van dit artikel het onderscheid tusschen de begrippen kleur en kleurindruk duidelijk te formuleeren, teneinde in een volgend artikel nader op de chromatische aanpassing te kunnen ingaan.

Onderscheid tusschen kleurindruk en kleur

Wij zullen het verschil tusschen de begrippen „kleurindruk" en „kleur" nader uitwerken door een vergelijkend overzicht te geven van de eigenschappen dezer beide begrippen. Wij beginnen met de kleurindrukken en geven na elke alinea de analoge constateeringen voor de kleuren.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Kleurindruk: De kleurindruk, die een voorwerp uit onze omgeving bij ons opwekt, wordt bepaald door de volgende drie groepen van oorzaken:

a) De spectrale verdeeling van het licht, dat het gekleurde voorwerp op ons oog werpt.

b) De „normale" mengeigenschappen van het oog, dwz. de mengeigenschappen voor gekleurd licht die gelden voor het normale oog onder gestandaardiseerde omstandigheden.

c) Allerlei bijkomstige omstandigheden, die betrekking hebben op de toestand waarin ons gezichtsorgaan zich toevallig bevindt.

Kleur: De kleuren, die men vindt als uitkomst van een technische kleurmeting — methoden hiertoe zijn reeds eerder in dit tijdschrift besproken [1]) —, worden alleen bepaald door de twee factoren (a) en (b).

Kleurindruk: De omstandigheden (c), die de kleurindruk welke een lichtbundel met gegeven physische eigenschappen op ons maakt, mede bepalen, behooren o.a. tot de volgende rubrieken:

1) Individueele eigenschappen van het oog van den waarnemer.

2) Eigenschappen van de waargenomen voorwerpen, die psychische invloeden in werking doen treden (bijv. de herinnering).

3) De toestand van het netvlies, die beïnvloed wordt door licht dat tegelijk met de waar te nemen bundel op andere deelen van het netvlies valt, of het tevoren reeds bereikte.

Kleur: Bij de meting van kleuren is de invloed van al dergelijke omstandigheden uitgeschakeld door diverse voorschriften, o.a.:

1) De waarnemer moet normaal zijn, en de metingen moeten bij voldoend hooge helderheid gebeuren [2]).

2) De meting bestaat in principe steeds in het beoordeelen van het niet-onderscheidbaar zijn van de beide helften van een cirkelvormig lichtvlekje. Een helft van het vlekje heeft de te meten kleur, de andere een vergelijkingskleur.

3) De rest van het gezichtsveld is donker.

Kleurindruk: Men kan zich als ideaal stellen het bezitten van volledige voorschriften, om de aard van een kleurindruk uit de verschillende physische omstandigheden te voorspellen. Daar de kleurindruk moeilijk in getallen is vast te leggen en bovendien afhangt van zooveel omstandigheden, waarvan er sommige van niet-physische aard zijn, zal dat ideaal nooit ten volle kunnen worden verwezenlijkt.

Kleur: Voor het meten van kleuren is men er dank zij de eenvoudige „normale mengeigenschappen" van het oog in geslaagd, volledige voorschriften te geven, zoodat we tegenwoordig tabellen bezitten, waarmee men de kleuren kan berekenen uit de resultaten van zuiver physische metingen, zonder dat een visueele beoordeeling noodig is. De kleuren worden vastgelegd door middel van de kleurcoördinaten [3]) x, y en z (C.I.E., 1931).

Kleurindruk: Kenmerkende eigenschappen van een kleurindruk zijn:

1) De kleurtoon: de eigenschap van een kleurindruk die ons er toe brengt, de kleur een bepaalde naam, als rood, groen of blauw, te geven.

2) De verzadigingsindruk: de mate waarin een kleurindruk van „wit" afwijkt; de mate van „gekleurd" zijn van de indruk; de eigenschap die ons doet spreken van vaal of fel.

3) De helderheidsindruk: de eigenschap die ons doet spreken van lichte en donkere kleuren.

Kleur: Een kleur kan men ook, in plaats van door x, y en z, vastleggen door:

1) De domineerende golflengte λ_d.

2) De verzadigingsgraad p: de beschouwde kleur kan nagebootst worden door een mengsel van de spectrale kleur λ_d en „wit" met de helderheidsverhouding $p:(1-p)$.

---

[1]) P. J. Bouma, Het zien van kleuren, Philips techn. T. 1, 282, 1936.

[2]) De eigenschappen van het normale oog hangen nl. beneden een bepaald helderheidsniveau nog af van de helderheid (Purkyně-effect). Verg. bijv. P. J. Bouma, Het helderheidsbegrip in verband met de wegverlichting en de fotometrie, Philips techn. T. 1, 142, 1936.

[3]) Zie bijv. P. J. Bouma, Het karakteriseeren van kleurindrukken door kleurenruimte en kleurendriehoek, Philips techn. T. 2, 39, 1937.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

3) De helderheid, die uit de helderheidsindruk ontstaat door standaardisatie van de meetcondities op soortgelijke wijze als het begrip kleur ontstaat uit de kleurindruk.

Kleurindruk: Bij de beoordeeling van een kleurindruk, beschouwt men meestal elke kleurindruk op zichzelf. Wil men deze vergelijken met een andere kleurindruk, dan beschouwt men de laatste afzonderlijk daarna. Er heeft successieve vergelijking plaats.

Kleur: Bij het visueel meten van kleuren, dat de grondslag vormt voor het opstellen van bovengenoemde voorschriften ter bepaling van de kleurcoördinaten, beschouwt men steeds twee kleuren tegelijk: de te meten kleur en de vergelijkingskleur. Er heeft hier dus simultane vergelijking plaats.

Kleurindrukken en kleuren, veroorzaakt door verschillende lichtsoorten

Houdt men de opgesomde verschillen goed in het oog, dan is het duidelijk, welk onderscheid er bestaat tusschen het bepalen van kleurindrukken en het meten van kleuren. Men is nu ook in staat de in de inleiding besproken verschijnselen te begrijpen, die optreden bij verlichting met verschillende lichtsoorten. We zullen thans, op dezelfde wijze als hierboven, het gedrag van kleurindrukken en kleuren voor het geval van verschillende lichtsoorten uitvoeriger vergelijken.

Kleurindruk: De vraag, in hoeverre men bij twee lichtsoorten met verschillende spectrale verdeeling van eenzelfde gekleurd voorwerp ook dezelfde kleurindrukken verkrijgt, is van belang, wanneer men onze geheele omgeving eerst met één der lichtsoorten verlicht en daarna met de andere.

Kleur: De vraag, in hoeverre bij twee verschillende lichtsoorten een voorwerp van onze omgeving dezelfde kleur verkrijgt, is vooral van belang, wanneer men beide lichtbronnen tegelijkertijd wil gebruiken.

Kleurindruk: Veranderingen, optredend bij de overgang van de ééne lichtsoort naar de andere kunnen o.a. daarin bestaan, dat de kleurtoon van sommige voorwerpen verandert, of dat een kleur meer naar voren springt door grootere helderheids- of verzadigingsindruk. Dergelijke veranderingen kan men duidelijk waarnemen, wanneer men bijv. gloeilampenlicht vervangt door kwiklicht.

Kleur: Verschillen tusschen twee tegelijk aanwezige lichtsoorten uiten zich o.a. in het optreden van de in de inleiding genoemde onaangename verschijnselen van valsch licht en gekleurde schaduwen, zooals men die waarneemt, wanneer in een met daglicht verlicht vertrek een gloeilamp wordt ontstoken.

Kleurindruk: Een beoordeeling van de gelijkwaardigheid van twee lichtsoorten, wat betreft de door hen opgewekte kleurindrukken, kan vooralsnog alleen langs experimenteele weg worden verkregen.

Kleur: Voor de beoordeeling van de gelijkwaardigheid van twee lichtsoorten, wat de door hen veroorzaakte kleuren betreft, staan o.a. twee in dit tijdschrift beschreven methoden ter beschikking [4]). De eerste is meer van experimenteele, de tweede van theoretische aard.

Kleurindruk: De experimenten komen er op neer, dat een groot aantal gekleurde kaartjes tegen een witte achtergrond eerst onder de eene lichtsoort en daarnà onder de andere lichtsoort worden bekeken. De vergelijking van de verkregen kleurindrukken is, wat de kleurtoon betreft, betrekkelijk eenvoudig mogelijk, daar we in dit opzicht onze indruk op doeltreffende wijze onder woorden kunnen brengen („ik noem deze kleurindruk geelgroen", enz.). Op dit soort van kleurbenaming zullen wij in het volgende artikel uitvoeriger ingaan. Daarentegen is de vergelijking van de beide andere kenmerken van de kleurindruk (helderheids- en verzadigingsindruk) veel moeilijker.

Er zij nog gewezen op het feit, dat hier een successieve vergelijking wordt toegepast, waarbij de omgeving, die na de overgang van de eene lichtsoort tot de andere ook ander licht naar het oog stuurt, de gelegenheid krijgt haar invloed ten volle te doen gelden. Dit strookt met het feit, dat wij te maken hebben met een beoordeeling van kleurindrukken.

[4]) P. J. Bouma, De kleurweergave bij gebruik van verschillende „witte" lichtbronnen, Philips techn. T. 2, 1, 1937.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Kleur: Bij de experimenteele methode belicht men van een groot aantal gekleurde kaartjes, die tegen een zwarte achtergrond worden gehouden, telkens een helft met één der lichtsoorten en gelijktijdig de andere helft met de andere lichtsoort. Het optredende kleurverschil (ook wat betreft helderheid en verzadigingsgraad) bij gelijktijdige waarneming der beide helften is een maat voor het verschil der beide lichtbronnen.

Er is hier sprake van een simultane vergelijking en de meetomstandigheden stemmen ten naaste bij overeen met die van de kleurmeting. Dit strookt met het feit, dat wij te maken hebben met een beoordeeling van kleuren.

Kleur-indruk: Een meer theoretische vergelijkingsmethode, die uitgaat van de spectrale verdeelingskrommen van de lichtbronnen, kan slechts worden ontwikkeld, indien blijkt dat de invloed der omgeving in rekening gebracht kan worden en men aldus kan voorspellen, welke veranderingen in de kleurindruk van een gekleurd voorwerp zullen optreden bij overgang van de eene lichtsoort tot de andere. Ook hiermee zal zich het reeds genoemde volgende artikel bezig houden.

Kleur: Bij de vermelde tweede, meer theoretische vergelijkingsmethode [5]), gaat men uit van de spectrale verdeelingskrommen van de lichtbronnen. Het spectrum wordt op oordeelkundige wijze in 8 vakjes verdeeld. Men kan dan zeggen, dat de twee lichtbronnen practisch als gelijkwaardig kunnen worden beschouwd, indien de relatieve lichtstroombijdragen van elk der vakjes binnen zekere toleranties dezelfde zijn. In geval er een merkbaar verschil tusschen de lichtbronnen bestaat, kan men de mate van dit verschil beoordeelen door uit te rekenen, welke verschillen in kleur-coördinaten een gekleurd voorwerp zal vertoonen bij overgang van de eene lichtsoort naar de andere.

Hoe groot de verschillen wel zijn, die kunnen optreden bij twee sterk verschillende lichtsoorten, is reeds eenigermate uit de voorbeelden in de inleiding gebleken. Een beeld er van kan ook op de volgende wijze worden verkregen. Voor 24 kaartjes uit een „kring" van Ostwald's kleurenatlas worden de kleurpunten van het teruggekaatste licht uitgerekend, wanneer ze achtereenvolgens met daglicht en met gloeilampenlicht worden verlicht [6]). We kozen hiervoor een kring van tamelijk verzadigde kleuren, nl. de *nc*-kring, die in zijn geheel bestaat uit 100 kaartjes, waarvan de verzadigingsindruk vrijwel constant is en waarvan de kleurtoon bij

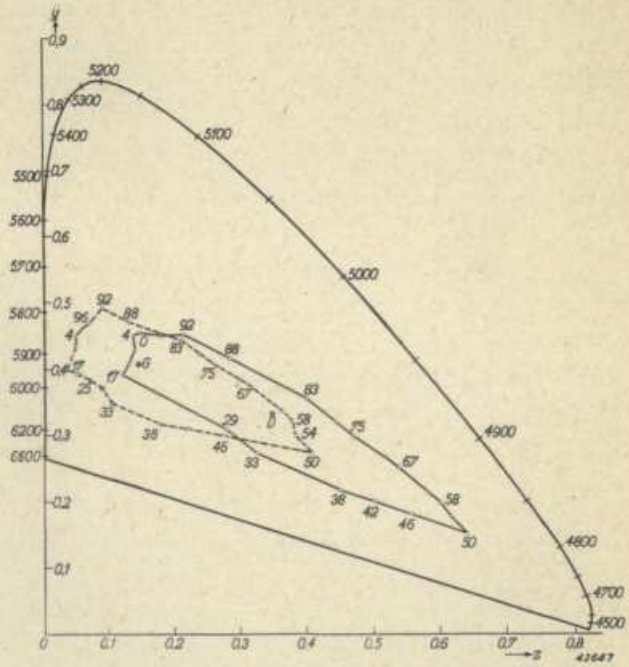


Fig. 1. Ligging van de kleurpunten voor de Ostwald-kaartjes *nc* 0, 4, 8, 13, ... in de internationale kleurendriehoek. Gestippelde lijn: bij belichting met gloeilampenlicht. Getrokken lijn: bij belichting met daglicht. *D* is het kleurpunt voor daglicht en *G* voor gloeilampenlicht. *y* en *x* kleurcoördinaten volgens de C. I. E. De getallen van 4500 tot 6600 geven de golflengte in Ångström-eenheden aan op de kromme der spectrale kleuren.

het doorloopen van de nummers 0-99 van geelgroen over geel, oranje, rood, purper, blauw, groen weer naar geelgroen loopt [7]). In *fig. 1* zijn de resultaten van deze berekening uitgezet.

Kleur-indruk: Bekijkt men nu achtereenvolgens bijvoorbeeld het kaartje 83 bij daglicht en bij gloeilampenlicht, dan blijkt de kleurindruk vrijwel dezelfde te zijn: het kaartje geeft ons onder beide omstandigheden een zuiver groene indruk.

---

[5]) Zie ook: P. M. van Alphen, Een fotometer voor het onderzoek van de kleurweergave van verschillende lichtbronnen, Philips techn. T. 4, 71, 1939.

[6]) Voor de rekenmethode zie: Philips techn. T. 2, 45, 1937.

[7]) In de nieuwe uitgaven van Ostwald's atlas bevat deze kring slechts de 24 gebruikte kaartjes.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Kleur: Uit fig. 1 ziet men echter, dat de beide kleurpunten 83 belangrijk uit elkaar liggen: de kleur is verschillend. Dit verschil in kleur vindt men bevestigd, wanneer men één helft van het kaartje verlicht met daglicht, de andere met het licht van gloeilampen, en deze beide helften tegelijk waarneemt.

Kleurindruk: Bekijkt men achtereenvolgens kaartje 47 bij gloeilampenlicht en kaartje 31 bij daglicht, dan ziet men een groot verschil. Het eerstgenoemde kaartje vertoont een violette kleurtoon, het andere een karmijnroode!

Kleur: Uit fig. 1 ziet men, dat de beide kleuren: 47 met gloeilampen verlicht en 31 met daglicht, nagenoeg overeenstemmen. Dit resultaat vindt men bevestigd door een proef, analoog aan die met de twee helften: men houdt de beide kaartjes, terwijl 47 met een gloeilamp en 31 met daglicht is verlicht, naast elkaar (simultane vergelijking).

De proeven moeten aldus worden verklaard, dat er inderdaad bij het vergelijken van kleurindrukken een factor meer werkzaam is dan bij het vergelijken van kleuren; een factor dus, die we in het begin van dit artikel onder (c) gerangschikt hebben. Blijkens de proeven kan deze factor er toe bijdragen, een overeenkomst in kleur om te zetten in een verschillende kleurindruk (laatste voorbeeld), maar hij kan onder bepaalde omstandigheden ook een verschil in kleur te niet doen, wat de kleurindruk betreft (eerste voorbeeld). Die factor is in dit geval voornamelijk te zoeken in de omgeving.

Kleurindruk: De omgeving heeft in het algemeen groote invloed op de kleurindrukken, zooals blijkt uit het laatstgenoemde voorbeeld, waar eenzelfde kleur in een andere omgeving een geheel andere indruk maakt. Die invloed berust er in hoofdzaak op, dat het netvlies een andere gevoeligheid krijgt voor de verschillende kleuren. Dit verschijnsel heet chromatische aanpassing van het oog.

Kleur: De omgeving heeft geen invloed op de kleuren. In feite zou men volgens de bovengenoemde voorschriften de omgeving geheel donker moeten laten, maar ook een niet-donkere omgeving zou op het meetresultaat vrijwel geen invloed hebben, omdat de twee te vergelijken kleuren altijd gelijktijdig en vlak naast elkaar vertoond worden; de twee stukjes van het netvlies waarop de twee gekleurde vlakjes afgebeeld worden, zijn dan altijd ten naaste bij op dezelfde wijze aangepast.

De groote invloed, die de omgeving op de kleurindruk uitoefent, kan nog op de volgende wijze gedemonstreerd worden (*fig. 2*). Een doorschijnend venster van 15 bij 15 cm kan aan de achterzijde verlicht worden met een aantal verschillend gekleurde lampen. Het venster is omgeven door een veld van 80 bij 80 cm, dat naar willekeur gloeilampenlicht of kunstmatig daglicht kan uitstralen;

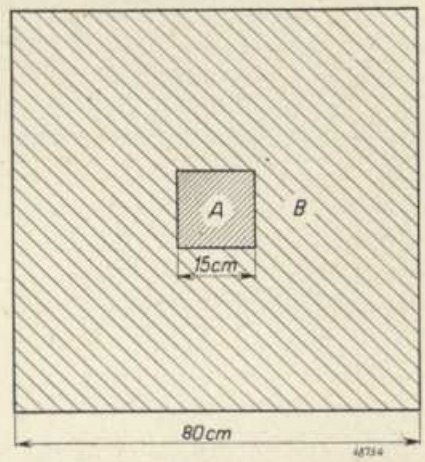


Fig. 2. De chromatische aanpassing van het oog kan zeer fraai worden gedemonstreerd door een doorschijnend venster *A* te verlichten met een lichtsoort van bepaalde kleur, en het omgevende veld *B* eerst bijv. kunstmatig daglicht, dan gloeilampenlicht te doen uitstralen. Het op *A* gerichte oog ziet eenige tijd na de omschakeling een verschuiving van de „kleur" van het venster optreden.

het door het venster uitgestraalde licht blijft daarbij onveranderd. Bekijkt men het geheel op enkele meters afstand en schakelt men nu de lichtsoort van het omgevende veld van daglicht over op gloeilampenlicht, dan neemt men in de meeste gevallen in het onveranderde kleine venster na eenige tijd een duidelijke „kleuromslag" waar.

Kleurindruk: De kleurindruk kan daarbij bijv. van oranjegeel tot geelgroen of van karmijnrood tot blauwpurper veranderen. In enkele gevallen verandert de kleurindruk echter hoegenaamd niet (blauw en oranje).

Kleur: De kleur die men aan het binnenvenster kan meten, verandert uiteraard niet, daar de lampen precies dezelfde zijn gebleven.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Hier zien we dus het veranderen van de kleurindruk tengevolge van de invloed der omgeving in zijn zuiverste vorm [8]).

Bij het voorbeeld van kaartje 83 hebben we gezien dat het kan gebeuren, dat een kleurverandering onder bepaalde omstandigheden toch geen wijziging van de kleurindruk veroorzaakt: het proces van de chromatische aanpassing van ons oog compenseert een aanvankelijk opgetreden kleurverschil. Dit verschijnsel doet zich in de practijk zoo veelvuldig voor (vergelijk ook de voorbeelden in de inleiding), dat men het in een wet heeft geformuleerd, die tientallen jaren lang groote opgang in de kringen van psychologen en physiologen heeft gemaakt:

Kleurindruk: „De kleurindrukken die de gekleurde voorwerpen van onze omgeving opwekken, zijn ten naaste bij onafhankelijk van de lichtsoort, waarmee we het geheele tafereel verlichten".

Kleur: De kleuren kunnen echter terzelfdertijd aanmerkelijk verschillend zijn, zooals dat bijv. in fig. 1 wordt geïllustreerd.

De genoemde regel van de onveranderlijkheid van de kleurindrukken geldt echter alleen maar voor lichtsoorten waarbij de spectrale verdeeling niet veel afwijkt van die der zwarte stralers en zelfs dan is het een benaderingsregel. Experimenteel kan men gemakkelijk kleine afwijkingen constateeren. Zoo blijven bijv. pigmenten, die een verschillende spectrale remissiekromme bezitten, maar, met een bepaalde lichtsoort belicht, dezelfde kleurindruk opwekken, bij verandering van lichtbron die gelijkheid niet langer behouden.

Wij zullen daarom de regel liever de volgende vorm geven: *Bij de meeste, in de practijk gebruikte lichtsoorten is het verschil tusschen de kleuren, die eenzelfde pigment onder twee verschillende lichtsoorten bezit, over het algemeen veel grooter dan het verschil tusschen de, door die kleuren veroorzaakte, kleurindrukken.*

Bijvoorbeeld, wanneer wij gloeilampenlicht en daglicht vergelijken:

Kleurindruk: Iedereen weet uit ervaring, dat het verschil in kleurindrukken die eenzelfde voorwerp levert, bij verlichting door deze beide lichtsoorten, heel gering is.

Kleur: Uit fig. 1 of door toepassing van de „8-vakjesmethode" of van de „vergelijkingsmethode van de beide helften" (zie boven) komt men tot de conclusie, dat het verschil in kleur voor een gegeven kaartje bij verschillende verlichting toch verrassend groot kan zijn.

Hiermede moge de vergelijking der begrippen kleur en kleurindruk worden besloten. Er is reeds op gewezen, dat over kleurindrukken veel minder bekend is dan over kleuren. In het bijzonder is het aantal onderzoekingen, waarin de kleurindruk die onder verschillende omstandigheden optreedt, wordt vastgelegd, nog zeer gering. De proeven en beschouwingen die het onderwerp van het volgende artikel zullen uitmaken, hebben ten doel een bijdrage te leveren tot onze kennis op dit gebied.

[8]) Dat de kleuromslag eerst eenige tijd na het omschakelen waargenomen wordt, wijst er op, dat het oog een zekere tijd noodig heeft om zich aan de omgeving aan te passen.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

EEN MERKWAARDIG VERSCHIJNSEL BIJ STEREOFONISCHE GELUIDSWEERGAVE

door K. de BOER.

534.76

Het geluidsbeeld, dat men waarneemt bij stereofonische geluidsweergave met twee luidsprekers, blijkt voor een geoefende luisteraar in het algemeen niet precies op de verbindingslijn der luidsprekers te liggen, doch een stuk er boven (eventueel er onder): het vertoont een elevatie. Dit merkwaardige verschijnsel kan tot in alle bijzonderheden, zelfs kwantitatief, worden verklaard door de bekende hypothese, dat het gewaar worden van de elevatie van een geluidsbron boven het horizontale vlak berust op kleine bewegingen van het hoofd. In de practijk der stereofonische weergave kan het verschijnsel geen noemenswaardige hinder veroorzaken.

In een installatie voor stereofonische geluidsweergave, zooals wij die in dit tijdschrift indertijd uitvoerig hebben besproken [1]), worden twee luidsprekers opgesteld ter weerszijden van een podium of projectiedoek. Elke luidspreker wordt via een eigen kanaal (versterker, enz.) gevoed uit een eigen microfoon, die in de opnameruimte is geplaatst (*fig. 1*). Bij weergave in een bioscoop is het geluid, dat elk der twee microfoons in de filmstudio opving, eerst in een geluidspoor op de film vastgelegd, en geeft elk der luidsprekers het geluid van het bijbehoorende geluidspoor weer. Schematisch kunnen we echter ook dit geval door fig. 1 voorstellen.

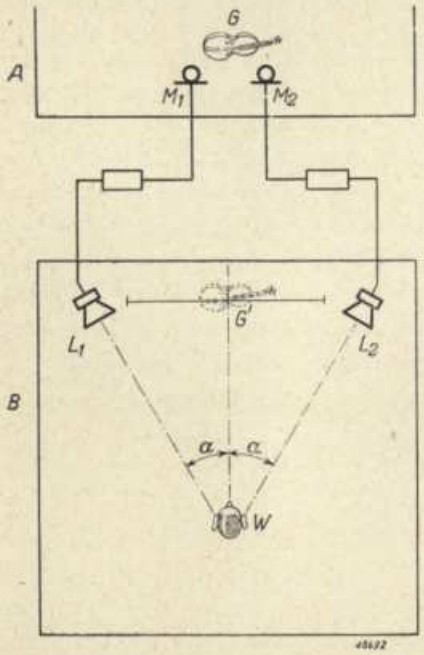


Fig. 1. Schematisch beeld van een opstelling voor stereofonische weergave. Twee luidsprekers L_1 en L_2 in de weergaveruimte B worden ieder gevoed door een bijbehoorende microfoon M_1 resp. M_2 in de opnameruimte A. (De microfoons zijn hier duidelijkheidshalve los staand geteekend, in werkelijkheid worden zij gewoonlijk in een „kunsthoofd" ondergebracht.) De luisteraar W neemt een virtueel beeld G' van de geluidsbron G waar. De opnameruimte kan bijv. een filmstudio, de weergaveruimte een bioscoopzaal zijn; in dat geval bevat het „kanaal" tusschen elke microfoon en de bijbehoorende luidspreker o.a. een geluidspoor, waarin die geluidsbijdrage is geconserveerd.

[1]) K. de Boer, Stereofonische geluidsweergave, Philips techn. T. 5, 112, 1940.

Wij onderstellen, dat een luisteraar zich bevindt in het midden van de zaal, waarin de luidsprekers staan. Speciaal bij weergave van het gesproken woord is nu een goed gelocaliseerd „geluidsbeeld" aan te geven, dwz. de luisteraar hoort het geluid, naar gelang van de plaats van de geluidsbron in de opnameruimte, van een bepaalde plaats tusschen de luidsprekers vandaan komen. Wij bepalen ons voorloopig tot het geval, dat de luisteraar het geluidsbeeld juist midden tusschen de luidsprekers waarneemt.

Bij luisteren door een aantal geoefende waarnemers is nu het verrassende feit ontdekt, dat het geluidsbeeld in het algemeen niet op de verbindingslijn van de twee luidsprekers wordt gelocaliseerd, zooals men zou verwachten, maar een stuk hierboven [2]): het heeft een zekere elevatie boven het horizontale vlak. Loopt de luisteraar, de middellijn van de zaal houdend, naar de luidsprekers toe, dan schuift het waargenomen geluidsbeeld steeds verder omhoog, eerst langzaam, dan echter naarmate de luisteraar dichter bij de luidsprekers komt, steeds sneller, totdat hij, wanneer hij midden tusschen de luidsprekers staat, het geluid van vrijwel recht boven zich hoort komen.

Een nog zonderlinger gewaarwording wacht den luisteraar die het hoofd opheft om te trachten het in de hoogte waargenomen geluidsbeeld te „zien", zooals hij gewend is om te doen bij geluidsbronnen met een elevatie (bijv. een vliegtuig). Het geluidsbeeld klimt dan nog verder omhoog en het gelukt niet de schijnbare geluidsbron „in het oog" te krijgen.

Enkele waarnemers constateeren, als zij recht vooruit kijken en er zich op concentreeren, een ge-

[2]) K. de Boer, Een merkwaardig verschijnsel bij het richtingshooren, Ned. T. Natuurk. 11, 75, 1944.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

luidsbeeld dat niet boven, maar beneden de verbindingslijn der luidsprekers ligt. Naar de luidsprekers toe loopende, hooren zij het geluidsbeeld steeds dieper onder de vloer verdwijnen, totdat het geluid van verticaal beneden schijnt te komen. Sommigen zelfs nemen het effect in deze vorm het gemakkelijkst waar.

Het effect kan in de practijk bij de stereofonische weergave in een concert- of bioscoopzaal geen noemenswaardige hinder veroorzaken. De afstanden, waarop de luisteraars zich van de luidspreker bevinden, zijn nl. voor de meeste zitplaatsen zoo groot, dat de waar te nemen elevatie vrij gering wordt. Men zal hierover, in hetgeen volgt, nog nadere gegevens vinden. Bovendien ligt eenerzijds het meerendeel der plaatsen niet in de middellijn van de zaal, anderzijds het geluidsbeeld (of -beelden) in het algemeen dichter bij de rechter of bij de linker luidspreker, en zoowel het een als het ander doet de waar te nemen elevatie verminderen. Ten slotte hebben we hier geenszins te maken met een effect dat zich aan de waarneming opdringt. Er is veeleer een zekere oefening voor noodig om het te constateeren. Dit is begrijpelijk, aangezien het gewaarworden en bepalen van de elevatie van een geluidsbron in het algemeen veel moeilijker en gebrekkiger plaats vindt dan het gewaarworden en bepalen van een azimuthale afwijking. Dientengevolge is de eerstgenoemde gewaarwording ook gemakkelijk te beïnvloeden door suggesties. Bij een stereofonische weergave bijv. van het geluid, opgenomen van een passeerend vliegtuig, bleek dat elke luisteraar van elke plaats uit het geluid van boven meende te hooren komen. Juist door deze gemakkelijke beïnvloeding wordt het geluidsbeeld bij stereofonische weergave met gelijktijdige beeldprojectie (bioscoop) altijd door het visueele beeld naar het horizontale vlak getrokken, ook voor een luisteraar die voldoende geoefend is om het beschreven elevatie-effect waar te nemen. Bij weergave van een concertstuk is een soortgelijke invloed aanwezig van de suggestie door de voorstelling die men heeft van de gebruikelijke plaatsing der orkestleden.

Ook al heeft het beschreven effect dus geen practische consequenties, zoo lijkt het ons toch heel instructief het hier nader te bespreken en mede te deelen, op welke wijze het verschijnsel kwalitatief en kwantitatief kan worden verklaard. We merken hierbij op, dat menigeen het effect thuis kan waarnemen, wanneer nl. zijn radiotoestel, terwille van een kwaliteitsverbetering („uitsmering" van het geluid), voorzien is van twee, op eenige afstand van elkaar geplaatste luidsprekers [3]).

Beschrijving der proeven en meetresultaten

Om het effect nader te onderzoeken en met name de waargenomen schijnbare elevaties te meten, is de in *fig. 2* geschetste opstelling gebruikt. Twee luidsprekers zijn ter hoogte van de ooren van den proefpersoon opgesteld. Midden tusschen de luidsprekers

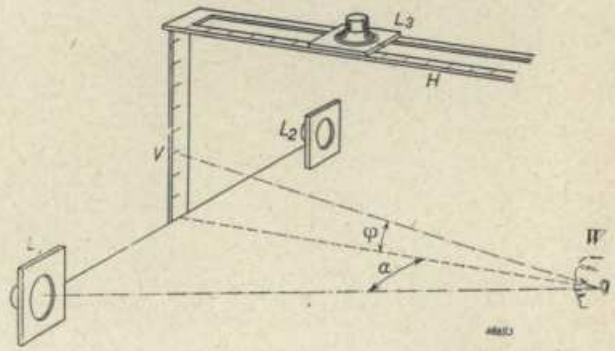


Fig. 2. Opstelling voor het meten van het waargenomen elevatie-effect. *V* verticale meetlat, waarop voor kleine elevaties φ de hoek direct door den luisteraar *W* wordt afgelezen. *H* horizontale meetlat met verschuifbare hulpluidspreker L_3, voor het bepalen van grootere elevaties.

staat een verticale meetlat. De proefpersoon bevindt zich in het symmetrievlak van de opstelling en kijkt steeds recht vooruit, hetgeen hij kan controleeren aan een merkteeken op de meetlat. Bij kleine elevatiehoeken van het geluidsbeeld kan hij de plaats er van direct op deze meetlat aflezen, zonder het hoofd op te heffen (wat immers niet toegestaan is aangezien het beeld dan verschuift). Omdat deze directe aflezing voor groote elevatiehoeken onmogelijk is, werd nog een horizontale meetlat aangebracht, waarlangs een hulpluidspreker verschoven kon worden (fig. 2). Bij een geschikte stand van deze luidspreker zal het geluid van de te localiseeren schijnbare geluidsbron uit dezelfde richting schijnen te komen als een telkens met de hulpluidspreker voor korte tijd gegeven signaal. De richting van het geluidsbeeld wordt hier dus met een „nulmethode" bepaald: de waarnemer behoeft slechts te oordeelen over het al of niet aanwezig zijn van een richtingsverschil ten opzichte van een vergelijkingssignaal.

De meetresultaten zijn in *fig. 3* weergegeven. Deze werden grootendeels door weinig geoefende waarnemers verkregen. Gezien de reeds vermelde

[3]) Bij het luisteren met twee luidsprekers, hetzij aangesloten op eenzelfde radiotoestel, hetzij in een opstelling voor stereofonische weergave. is het voor het verkrijgen van een natuurlijke indruk, met een goed gedefinieerd geluidsbeeld, noodzakelijk dat de beide luidsprekers in fase trillen; dwz. het membraan moet voor beide tegelijk naar den luisteraar toe en weer tegelijk van hem af bewegen. Het in fase of tegenfase brengen van de eene luidspreker met de andere geschiedt eenvoudig door hem om te draaien of zijn aansluiting om te polen.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

moeilijkheid van dit soort localisaties waren derhalve de waarnemingen niet goed reproduceerbaar en was de spreiding zeer aanzienlijk. Toch ziet men in de figuur duidelijk de kwalitatief reeds aange-

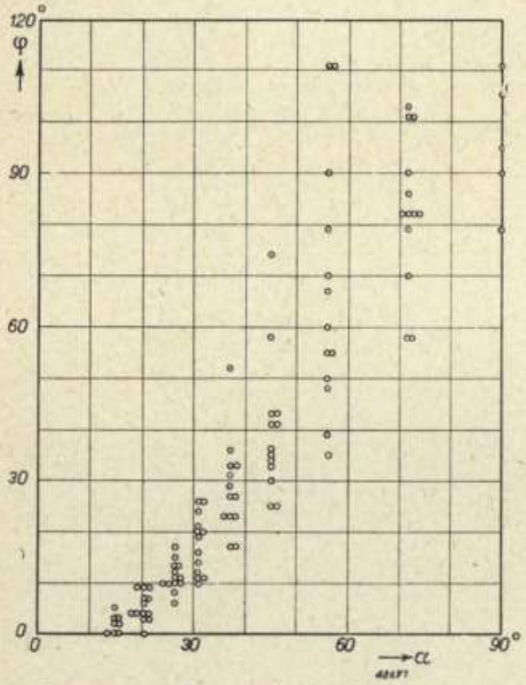


Fig. 3. Gemeten waarden van de elevatiehoek φ, waargenomen door een aantal (weinig geoefende) luisteraars, als functie van de afstand tusschen luisteraar en luidsprekerpaar (deze afstand gemeten door de hoek α, zie fig. 1 en 2).

geven bijzonderheden van het verschijnsel. Uitgezet is de elevatiehoek φ van het waargenomen geluidsbeeld bij verschillende afstanden van den luisteraar tot het luidsprekerpaar. Deze afstand is gemeten door de hoek α tusschen het symmetrievlak en de lijn luidspreker-proefpersoon (fig. 1 en 2). Wij zien, wanneer α grooter wordt en de luisteraar dus dichterbij komt, hoe het geluidsbeeld eerst langzaam en dan sneller omhoog loopt. Bij $\alpha = 90°$, dus als de waarnemer juist tusschen de luidsprekers staat, komt het geluid niet precies van boven, doch iets van achteren ($\varphi \approx 100°$).

Verklaring van het verschijnsel

Aangezien het beschreven verschijnsel bestaat uit een elevatie van een schijnbare geluidsbron, ligt het voor de hand dat de verklaring er van zal moeten aansluiten op de theorie waarmee het gewaarworden van de elevatie van een werkelijke geluidsbron wordt verklaard.

Deze theorie is in dit tijdschrift reeds een keer uitvoerig behandeld [4]). In het kort komt zij neer op het volgende. Een richtingsgewaarwording ontstaat door het optreden van een intensiteitsverschil aan de beide ooren [5]). Geen verschil, dwz. de intensiteitsverhouding $v = 1$, correspondeert met de richtingsgewaarwording „recht vooruit". Even goed treedt echter $v = 1$ op bij een geluidsbron „recht boven" of „recht achter" of in het algemeen bij een willekeurige elevatie van de geluidsbron in het symmetrievlak van den waarnemer (*fig. 4*). Een criterium om deze gevallen te onderscheiden en de elevatiehoek te „bepalen", verkrijgt de luisteraar door kleine min of meer onwillekeurige bewegingen van het hoofd om een verticale as (neenschudden). Bij een draaiing $d\alpha$ zal de verhouding v der intensiteiten aan de beide ooren met een bedrag dv, dat bij benadering evenredig met $d\alpha$ is, veranderen. Speciaal bijv. bij een geluidsbron „recht vooruit", waarbij het vlak door de geluidsbron en de ooras horizontaal ligt, is $dv = 3\%$ (0,14 db) voor $d\alpha = 1°$. Heeft de geluidsbron echter een elevatie φ, dan is, voor een bepaalde draaiing $d\alpha$, de effectieve draaiing $d\alpha'$ in het vlak door de geluidsbron en de ooras (fig. 4) kleiner, nl.

$$d\alpha' = d\alpha \cdot \cos \varphi.$$

Evenredig kleiner is ook de wijziging dv' in de intensiteitsverhouding bij een draaiing $d\alpha$. Het gehoor interpreteert nu op grond van zijn ervaring het feit, dat voor een gegeven $d\alpha$ een te kleine dv' optreedt, als een elevatie van de geluidsbron, en

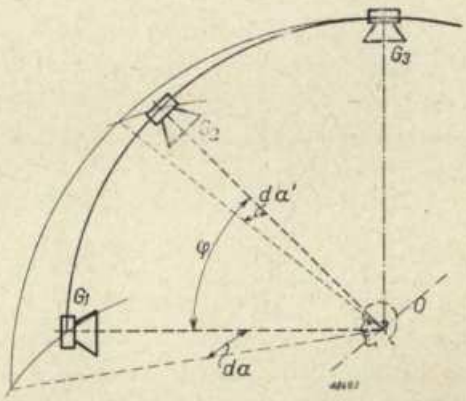


Fig. 4. Verschillende geluidsbronnen G_1, G_2, ... in het symmetrievlak van het hoofd van den luisteraar geven alle een intensiteitsverhouding $v = 1$ tusschen het geluid aan de beide ooren. Bij „neen"-schudden van het hoofd over een hoek $d\alpha$ ontstaat een wijziging dv in de intensiteitsverhouding, die voor de bron G_1 in het horizontale vlak het grootst is. Voor een bron G_2 met elevatie φ is nl. de effectieve draaiing $d\alpha'$, in het vlak door G_2 en de ooras O, slechts $d\alpha \cos \varphi$.

[4]) K. de Boer en A. Th. van Urk, Eenige bijzonderheden bij het richtingshooren, Philips techn. T. **6**, 363, 1941.

[5]) Ook de begeleidende tijdsverschillen dragen tot een richtingsgewaarwording bij, verg. het in [1]) aangehaalde artikel; doch hun invloed is, bij niet zeer groote hoeken α, zoo klein, dat wij ons hier geheel tot intensiteitsverschillen kunnen bepalen.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

wel doet het dit kwantitatief, volgens de betrekking [6]):

$$\cos\varphi = \frac{d\alpha'}{d\alpha} = \frac{dv'}{dv} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (1)$$

De aldus door het oor „gemeten" elevatie is in werkelijkheid niet de hoek ten opzichte van het horizontale vlak, maar ten opzichte van een vast met het hoofd verbonden referentievlak, dat bij de gewone stand van het hoofd horizontaal is. Dit is van belang voor het geval dat het hoofd opgeheven wordt, waarbij het referentievlak dus meegaat. Krijgt de luisteraar de geluidsbron in het oog, dan beteekent dit, dat de bron weer in het referentievlak ligt en verwacht hij dus, dat zijn gehoor de elevatie nul zal meten.

Tot zoover de verklaring voor het gewaarworden van de elevatie van een werkelijke geluidsbron. Keeren we nu terug tot onze opstelling voor stereofonische weergave, fig. 1. Hier wordt een schijnbare geluidsbron recht vooruit waargenomen ten gevolge van de samenwerking van twee rechts en links geplaatste luidsprekers. We kunnen ons weer afvragen, welke wijziging van de intensiteitsverhouding aan de beide ooren zich hier zal voordoen, als de luisteraar zijn hoofd een hoek $d\alpha$ om de verticale as draait. *Deze wijziging blijkt nu inderdaad kleiner te zijn dan die welke het gehoor bij een werkelijke geluidsbron recht vooruit zou verwachten.* Het gehoor besluit dus tot de aanwezigheid van een elevatie!

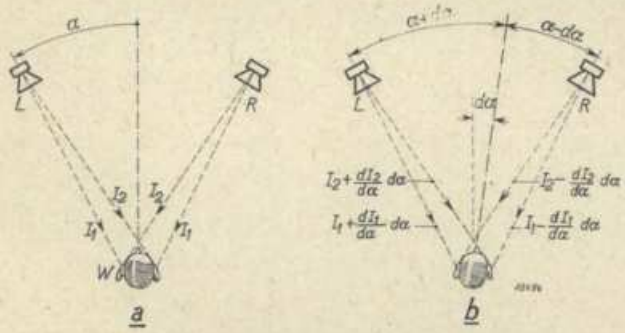


Fig. 5. *a*) De luidspreker *L*, geplaatst op een hoek α uit het symmetrievlak van het hoofd van den luisteraar *W*, levert de geluidsbijdragen I_1 resp. I_2 aan het dichtstbijzijnde en het andere oor. Evenzoo de luidspreker *R* (het geluidsbeeld wordt in het symmetrievlak ondersteld).

b) Na een kleine draaiing $d\alpha$ van het hoofd staat de linker luidspreker onder de hoek $\alpha + d\alpha$ met het symmetrievlak van den luisteraar, de rechter luidspreker onder de hoek $\alpha - d\alpha$. Dienovereenkomstig zijn de resp. geluidsbijdragen aan de beide ooren gewijzigd tot de in de figuur aangegeven waarden.

[6]) Een soortgelijke, iets gegeneraliseerde betrekking zal ook gelden voor het geval, dat de geluidsbron niet in het symmetrievlak van den waarnemer ligt, waarbij reeds in de rusttoestand de intensiteitsverhouding v van 1 verschilt. We blijven ons echter eenvoudigheidshalve beperken tot geluidsbronnen in het symmetrievlak.

Dat de optredende dv' kleiner zal zijn dan voor een werkelijke geluidsbron, kan men als volgt inzien.

Wij noemen I_1 en I_2 de geluidsintensiteiten, die één luidspreker zou geven resp. aan het dichtstbijzijnde en aan het andere oor, wanneer de luidspreker een hoek α uit het symmetrievlak is geplaatst (*fig. 5a*). Bij recht vooruit kijken ontvangt ieder oor de totale intensiteit $I_1 + I_2$. Draait de luisteraar nu het hoofd over een hoek $d\alpha$ naar rechts, dan wordt de hoekafwijking van de luidspreker *L* vergroot tot $\alpha + d\alpha$, die van de luidspreker *R* wordt verkleind tot $\alpha - d\alpha$. Aan het linker oor arriveeren nu (fig. 5*b*) de gewijzigde geluidsbijdragen

$$I_1 + \frac{dI_1}{d\alpha}d\alpha \text{ van } L, \text{ en } I_2 - \frac{dI_2}{d\alpha}d\alpha \text{ van } R.$$

Analoog voor het rechter oor. De intensiteitsverhouding aan beide ooren, die oorspronkelijk 1 was, is thans:

$$1 + dv' = \frac{I_1 + \frac{dI_1}{d\alpha}d\alpha + I_2 - \frac{dI_2}{d\alpha}d\alpha}{I_1 - \frac{dI_1}{d\alpha}d\alpha + I_2 + \frac{dI_2}{d\alpha}d\alpha}$$

$$\approx 1 + \frac{2}{I_1 + I_2} \cdot \frac{d}{d\alpha}(I_1 - I_2)\,d\alpha.$$

Dus

$$dv' = \frac{2}{I_1 + I_2} \cdot \frac{d(I_1 - I_2)}{d\alpha}d\alpha \quad . \quad . \quad . \quad (2)$$

De functies $I_1(\alpha)$ en $I_2(\alpha)$ geven eenvoudig de geluidsintensiteit aan, die één enkele luidspreker, bijv. *L* in fig. 5*a*, resp. aan het dichtstbij gelegen en aan het andere oor teweeg brengt, indien deze luidspreker zich om het hoofd van den waarnemer beweegt op de in fig. 5*a* door de pijl aangegeven wijze. Deze intensiteit als functie van α is bepaald door Sivian en White [7]), wier resultaten in *fig. 6* worden weergegeven door de krommen I_1 en I_2. In deze figuur zijn tevens de krommen $I_1 + I_2$ en $I_1 - I_2$ als functie van α geteekend. Hiermee is het dus mogelijk, voor elke hoek α (correspondeerende met een bepaalde afstand van den luisteraar tot het luidsprekerpaar) de optredende effectieve wijziging dv' in de intensiteitsverhouding volgens (2) te berekenen, en dan door vergelijking met de eerder opgegeven „normale" wijziging ($dv \approx 3\%$ voor $d\alpha = 1°$) de te verwachten „elevatie" volgens (1) te voorspellen.

Dat $dv' < dv$, dus dat werkelijk sprake zal zijn van een reële elevatiehoek ($\cos\varphi < 1$), kan men uit fig. 6 afleiden met behulp van de overweging,

[7]) J. Sivian en S. B. White, J. Acoust. Soc. Amer. **4**, 288, 1933.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

dat in het grensgeval $\alpha = 0$, waarbij de luisteraar zeer ver van de luidsprekers verwijderd staat, beide luidsprekers tezamen als één werkelijke geluidsbron recht vooruit fungeeren. De voor dit geval uit (2)

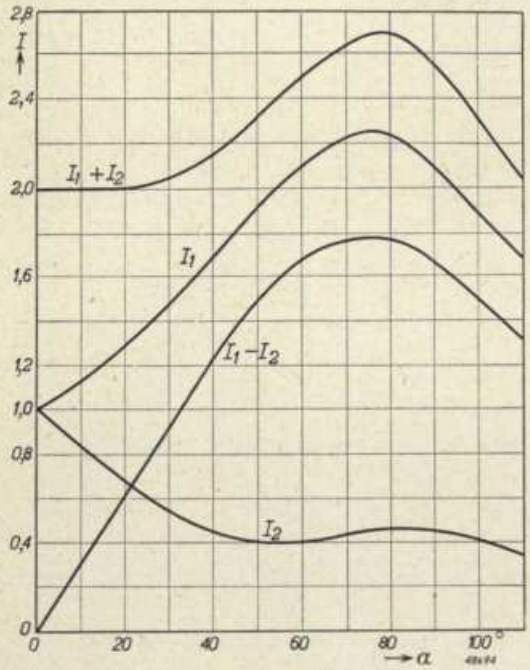


Fig. 6. De geluidsbijdragen van een luidspreker aan het dichtstbijzijnde (I_1) en het andere oor (I_2), als functie van de hoek α waarover de luidspreker uit het symmetrievlak van den luisteraar is gedraaid (zie de pijl bij α in fig. 5a). De krommen zijn afgeleid uit metingen van Sivian en White [7]). Tevens zijn uitgezet de grootheden $I_1 + I_2$ en $I_1 - I_2$, die voor de berekening van de waargenomen elevatie worden gebruikt.

berekende wijziging dv' zal dus dezelfde zijn als die, welke het gehoor bij het normale hooren in deze situatie heeft geleerd en als maatstaf gebruikt (dv). Men ziet nu uit fig. 6, dat de kromme $I_1 + I_2$ (noemer van de breuk in (2)) voor $\alpha = 0$ lager ligt dan voor elke andere waarde van α, terwijl de helling van de kromme $I_1 - I_2$ (teller van (2)), bij $\alpha = 0$ juist grooter is dan voor elke andere waarde van α. De waargenomen wijziging dv' is dus voor elke hoek α zeker kleiner dan die voor $\alpha = 0$, d.i. de normaal verwachte.

Nadere toetsing van de verklaring

De beschreven berekening van de te verwachten elevatie, met behulp van de krommen in fig. 6 en de verg. (2) en (1), geeft als resultaat de in *fig. 7* geteekende kromme. De experimenteel bepaalde elevaties, nl. de zwaartepunten van de in fig. 3 weergegeven meetseries, zijn hierin eveneens geteekend. Men ziet, dat de overeenstemming heel behoorlijk is. In het gebied der kleine hoeken is de berekening zeer onnauwkeurig, daar de beperkte nauwkeurigheid der metingen van Sivian en White (die bovendien eenigszins van het frequentiespectrum van het geluid afhangen) hier groote invloed heeft. Bij groote α is de berekening betrouwbaarder, en zelfs leidt hier de berekening tot voorspelling van de boven reeds gesignaleerde bijzonderheid, dat de luisteraar, als hij op de verbindingslijn der luidsprekers is aangekomen, het geluid niet recht van boven, maar iets van achteren zal hooren. Het is wel opmerkelijk, dat de eenvoudige hier ontwikkelde theorie ook dit detail goed weergeeft.

Dat sommige luisteraars een negatieve in plaats van een positieve elevatie kunnen waarnemen, is niet in tegenspraak met de theorie. Aangezien nl. bij negatieve elevatie even goed een te kleine dv' optreedt als bij positieve, maakt de theorie tusschen deze beide gevallen in het geheel geen verschil. Waarom echter in sommige gevallen juist een voorkeur voor het waarnemen van de, eenigszins ongewone, negatieve elevatie wordt geconstateerd, is moeilijk te verklaren.

Rest ons nog te beschouwen de onmogelijkheid om de schijnbare geluidsbron door opheffen van het hoofd in het vizier te krijgen. Ook dit is nu zonder moeite te begrijpen. Luistert men naar een werkelijke geluidsbron met een elevatie en heft men het hoofd geleidelijk op, dan wordt de wijziging dv' in de intensiteitsverhouding aan de beide ooren bij neen-schudden steeds grooter, doordat de elevatie van de bron boven het referentievlak afneemt. Gaat het referentievlak door de bron, dan is dv' gelijk geworden aan de door het gehoor als norm beschouwde waarde, dus niet meer „te klein", en de

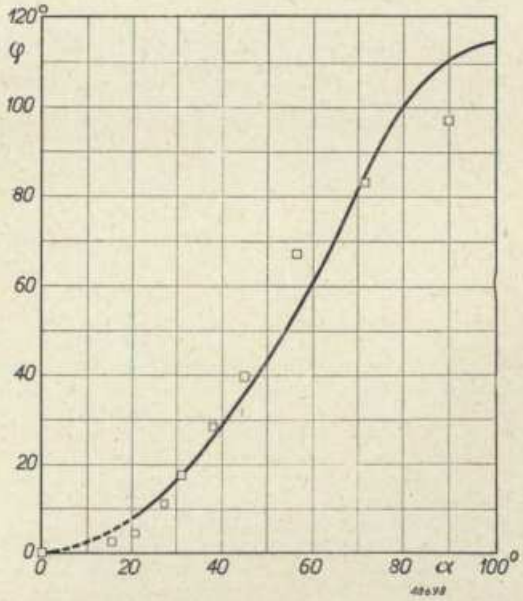


Fig. 7. Berekende elevatie φ van een recht vooruit gelegen, schijnbare geluidsbron, als functie van de afstand tot de beide luidsprekers (hoek α). Voor zeer groote afstanden (kleine α) is de berekening nogal onzeker, de kromme is in dit gebied gestippeld geteekend. De vierkantjes zijn de zwaartepunten der in fig. 3 weergegeven meetseries.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

gewaarwording van een elevatie is verdwenen. Bij onze proeven met een schijnbare geluidsbron werd de „te kleine" waarde van dv' veroorzaakt door de samenwerking van de twee luidsprekers. Heft men het hoofd op, steeds recht vooruit kijkende, dan blijven de geluidsbijdragen aan de beide ooren inclusief de veranderingen hiervan bij het neen-schudden, in eerste benadering dezelfde, dv' blijft dus onveranderd „te klein" en de gewaarwording van een elevatie blijft bestaan. Het geluidsbeeld gaat dus mee omhoog.

Ook de ingewikkelder verschijnselen die optreden, indien het schijnbare geluidsbeeld niet midden tusschen de luidsprekers ligt of de luisteraar zich niet in het symmetrievlak van de opstelling bevindt, kunnen op de uiteengezette wijze worden verklaard. We zullen hier niet verder op ingaan. Alleen het reeds vermelde feit, dat in dergelijke situaties de elevatie steeds kleiner is dan in het door ons beschouwde geval, willen we nog even in herinnering roepen. Hiermee en met behulp van fig. 7 kunnen we nu nl. aangeven, welke beteekenis het effect in de practijk van de stereofonische weergave zou kunnen hebben, bijv. in een bioscoopzaal. Een waargenomen elevatie van ca 20° zal nog zonder moeite door de suggestie van het visueele beeld gecorrigeerd worden. Er zal dus geen elevatie waargenomen worden op plaatsen die verder van het projectiedoek af liggen dan het punt beantwoordende aan de hoek $\alpha = 30°$ (zie fig. 7). Bij een onderlinge afstand der luidsprekers van bijv. 8 m zou dus slechts op plaatsen dichter dan ca 7 m bij het doek het elevatie-effect, voor een geoefende luisteraar, waarneembaar zijn. Het aantal dezer plaatsen, die bovendien reeds uit anderen hoofde als weinig geschikt worden beschouwd, is slechts een gering percentage van het totaal aantal plaatsen in een normale zaal.

EEN NIEUWE METHODE VAN ELECTRISCHE VOCHTBEPALING

door J. BOEKE. 543.812:621.317.39

Beschrijving van een nieuwe methode voor de bepaling van het watergehalte in vaste of vloeibare stoffen, zooals graan, hout, textiel, boter enz. Het water wordt uit de stof geëxtraheerd met behulp van aceton, waarin oxaalzuur is opgelost. De toeneming van het geleidingsvermogen van de extractievloeistof dient als maat voor de opgenomen hoeveelheid water. Ten opzichte van bestaande methoden heeft men het voordeel van een weinig kostbaar, eenvoudig te bedienen toestel en van een zeer redelijke snelheid van werken, terwijl men onafhankelijk is van de vorm, waarin de te onderzoeken stof voorkomt.

De bepaling van het watergehalte in gassen, vloeistoffen en vaste stoffen is een der belangrijkste analyses, die in handel en industrie geregeld voorkomen. Het vochtgehalte van graan, van tabak, van boter, om maar enkele voorbeelden te noemen, wordt door een kooper meebetaald en er kunnen groote winsten of verliezen mee gemoeid zijn, als per kilogram van het product enkele grammen water meer of minder dan geraamd aanwezig zijn. Het is dan ook begrijpelijk, dat men op talrijke manieren getracht heeft meetmethoden te ontwikkelen om de vochtbepaling snel en nauwkeurig uit te voeren.

De eenige universeele methode is tot nu toe (als we ons tot vaste stoffen en vloeistoffen beperken): drogen van een monster, en bepalen van het vrijgekomen water door wegen. Vaak evenwel is dit een langdurig en weinig gemakkelijk procédé. Een vlugger werken wordt mogelijk gemaakt door een aantal electrische meetmethoden, waarbij directe metingen aan een monster worden verricht, zonder eenige voorafgaande bewerking. Men heeft in hoofdzaak driërlei meetmethoden op deze basis ontwikkeld. Bij de eerste wordt het verschil in diëlectrische constante van de vochtige en de droge stof bepaald; bij de tweede meet men de diëlectrische verliezen; bij de derde het geleidingsvermogen. Bij al deze methoden hangen echter de uitkomsten sterk af van de vorm waarin zich de te onderzoeken stof bevindt (brokken, korrels, poeder, vloeistof). Deze vorm beïnvloedt immers de vulfactor, als men het te meten monster in een gegeven meetvaatje brengt. Het gevolg is, dat men slechts relatieve vochtigheidswaarden meet en dat voor elke stof, met zijn bepaalde vorm, een afzonderlijke ijkkromme noodig is, indien men tot absolute waterhoeveelheden wil overgaan.

Teneinde de invloed van de vorm van de stof te elimineeren (hetgeen dus zeggen wil, dat men het absolute watergehalte bepaalt met slechts één ijk-

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

kromme voor alle stoffen), is een andere groep van methoden ontwikkeld, die berusten op het extraheeren van het water uit de vochtige stof. In onderstaande tabel zijn de belangrijkste methoden van deze soort bijeengebracht en kort gekenschetst. Behalve het reeds eerder vermelde drogen, dat feitelijk ook in deze groep thuishoort en daarom mede in de tabel is opgenomen, doen de hierin aangegeven methoden wat snelheid van werken betreft niet veel onder voor de directe electrische metingen. Een bezwaar is echter, dat zij alle een vrij kostbare apparatuur vereischen, welke niet door leeken kan worden bediend [1]).

Naam procédé	Extractie-middel	Bewerking	Bepaling van het geëxtraheerde water door:
Drogen	lucht (vacuum)	circulatie, evtl. verhitten	gewicht
Meedestilleeren	tolueen	destillatie	volume
„Exluan"-procédé	dioxaan	mengen, evtl. malen	diëlectrische constante
Titratie volgens Fischer	methanol	mengen, evtl. malen	potentiometrische titratie met reagens volgens Fischer

Het is ons nu gebleken, dat men op de grondslag van het extraheeren een meetmethode kan ontwikkelen, welke onder behoud van een redelijke snelheid de voordeelen van een zeer eenvoudige bediening en een weinig kostbare apparatuur biedt.

De grondgedachte is deze. Water wordt uit de te onderzoeken stof geëxtraheerd met een hygroscopische (water aantrekkende) vloeistof, welke op zichzelf een laag geleidingsvermogen heeft en een gering dissocieerend vermogen voor electrolyten. In de extractievloeistof is een electrolyt opgelost, dat dus aanvankelijk weinig gedissocieerd zal zijn, zoodat de oplossing ook slechts een gering geleidingsvermogen bezit. Wateropneming door de extractievloeistof verhoogt zijn dissocieerend vermogen, het electrolyt wordt dus sterker gedissocieerd en het gevolg is een sterke vergrooting van het geleidend vermogen van de vloeistof, dat met eenvoudige middelen kan worden gemeten.

Als extractievloeistoffen met de gewenschte eigenschappen komen methyl- en aethylalcohol in aanmerking, maar nog beter geschikt is aceton. Als electrolyt kan oxaalzuur worden gebruikt, daar dit zeer goed in aceton oplost [2]). Maakt men een oplossing van 10% oxaalzuur in aceton, dan loopt het geleidingsvermogen van deze oplossing als functie van het watergehalte sterk op, zooals blijkt uit de getrokken kromme in *fig. 1*. Variatie

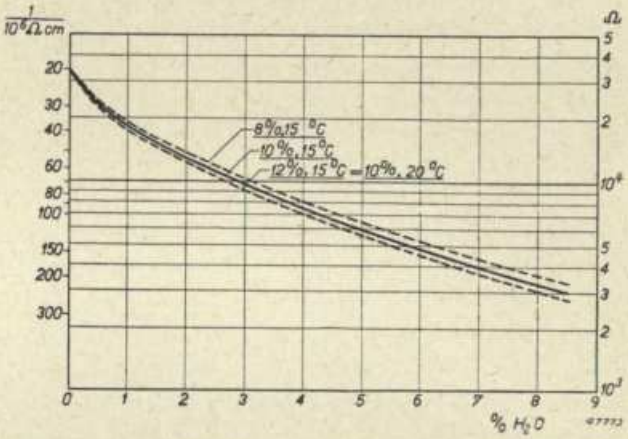


Fig. 1. Geleidingsvermogen resp. in het meetvaatje gemeten weerstand, van aceton met een bepaald percentage opgelost oxaalzuur, als functie van de opgenomen hoeveelheid water. De drie krommen gelden voor verschillende oxaalzuurconcentraties en temperaturen, als aangegeven.

in het gehalte aan oxaalzuur maakt betrekkelijk weinig verschil, hetgeen de gestippelde krommen laten zien; ook de invloed van temperatuurveranderingen is gering.

Er dient nog gelet te worden op de mogelijkheid, dat de te onderzoeken stof keukenzout of andere zouten bevat. Keukenzout is in zuivere aceton practisch onoplosbaar en verhoogt het geringe geleidingsvermogen van aceton nauwelijks. Een geringe toevoeging van water veroorzaakt echter een beter oplossen van het keukenzout in de aceton, terwijl het keukenzout, dat oplost, gedissocieerd wordt, zoodat het geleidingsvermogen toeneemt. Dit effect, dat dus berust op het verhoogde oplossend vermogen van de aceton bij wateropneming, is zelfs nog sterker dan het effect van het verhoogde dissocieerend vermogen waarvan bij onze meetmethode gebruik wordt gemaakt, en de vraag ligt voor de hand, waarom de geheele methode dan niet liever op het eerstgenoemde effect wordt opgebouwd. Dit zou beteekenen, dat men een overmaat vast keukenzout in plaats van oxaalzuur toevoegt. Een bezwaar blijkt dan echter te zijn, dat het keukenzout in aceton met weinig water (bijv. $<5\%$) zeer langzaam in oplossing gaat. De instelling

[1]) Een overzicht van de verschillende methoden van vochtbepaling vindt men in: E. Eckert en P. Wulff, Z. angew. Chemie **53**, 403-405, 1940.

[2]) Eenvoudiger zou het zijn, indien de extractievloeistof zelf als electrolyt kon fungeeren; sterk zwavelzuur bijv. is hygroscopisch en tevens wordt bij wateropneming zijn dissociatie en daarmede het geleidingsvermogen sterk vergroot. Het gelukt echter niet een stof te vinden die alle gewenschte eigenschappen in zich vereenigt. Zwavelzuur bijv. is chemisch te agressief.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

van het evenwicht kan dagen duren, hetgeen voor de practische metingen zeer bezwaarlijk zou zijn. Voor onze, op de dissociatie van oxaalzuur gebaseerde methode daarentegen heeft de trage oplossing van keukenzout juist het voordeel, dat van het zoutgehalte van de te onderzoeken stof niet veel last wordt ondervonden. Men moet er slechts voor zorgen, dat de extractie binnen twee uren afloopt en dat het tenslotte verkregen aceton-oxaalzuur-watermengsel niet meer dan enkele procent water bevat. Gaat men aldus te werk, dan worden slechts bij objecten met buitengewoon groot zuitgehalte, zooals bijv. gezouten visch, groote afwijkingen van de ijkkromme van fig. 1 geconstateerd. De schijnbare hoeveelheid water kan dan wel eens het dubbele zijn van de werkelijke, door drogen bepaalde. Bij hout, papier, textiel en dergelijke vindt men evenwel cijfers voor het watergehalte, welke absoluut genomen hoogstens enkele tiende procent verschillen van het watergehalte dat door drogen wordt bepaald.

De nauwkeurigheid van de methode wordt, evenals bij de anode op extractie berustende methoden, goeddeels beperkt door het bekende verschijnsel, dat de laatste waterresten door het te extraheeren object zeer hardnekkig worden vastgehouden en de evenwichtstoestand, waarbij een zeer kleine hoeveelheid vocht definitief in het te extraheeren object blijft, slechts langzaam wordt bereikt. Speciaal eiwithoudende stoffen hebben deze eigenschap in sterke mate. Tarwekorrels bijv., welke drie etmalen in een vacuum van 20 mm Hg gelegen hadden, waarbij de temperatuur gedurende 10 uren op 65 °C was gehouden, verloren de volgende twee etmalen in vacuum nog weer 1,6 gewichtsprocent water. Het verschijnsel maakt het zeer moeilijk om, met welke methode dan ook, het absolute vochtgehalte van zulke stoffen te bepalen. Toch heeft de extractie met aceton althans het voordeel, dat het bovengenoemde evenwicht zich veel sneller instelt dan bijv. bij het drogen in lucht of vacuum.

Bij de practische uitvoering van de methode moet er o.a. voor gezorgd worden, dat tijdens de extractie en de daarna volgende meting van het geleidingsvermogen geen aceton verdampen kan, waardoor de oxaalzuurconcentratie zou gaan oploopen. Hiervoor is het gewenscht om de meting in een geheel gesloten toestel uit te voeren, zooals in *fig. 2* is voorgesteld. Dit toestel bestaat uit een soort molentje met een hierop gemonteerd meetvaatje. Een afgewogen hoeveelheid stof en een afgemeten hoeveelheid aceton met 10% oxaalzuur worden in het molentje gebracht, waarna dit wordt dichtgeschroefd. Nadat de stof en de extractievloeistof goed door elkaar gemalen zijn en men het geheel een à twee uren heeft laten staan, kantelt men het molentje, zoodat het extract, gefilterd door een

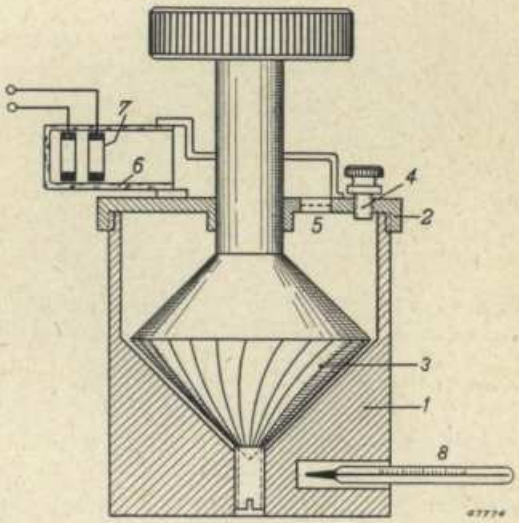


Fig. 2. Toestel voor de vochtbepaling door waterextractie en meting van het geleidingsvermogen. Nadat het bakje *1* met een gewogen monster van de te onderzoeken stof is gevuld, wordt het deksel *2* met de maalconus *3*, die kan worden gedraaid en op en neer gehaald, er op geschroefd. Door de vuldop *4* wordt een bepaalde hoeveelheid extractievloeistof ingebracht. Door drukkend draaien van de van maalgroeven voorziene conus worden monster en vloeistof door elkaar gemengd. Na beëindigde extractie kantelt men het toestel, waardoor de vloeistof via het zeefje *5* in het luchtdicht ingezette meetvaatje *6* met de platina-electroden *7* loopt en de weerstand tusschen deze electroden kan worden gemeten. *8* is een thermometer.

zeefje, in het meetvaatje komt. Dit is een cel met twee platina-electroden. Daar de configuratie van electroden en hiertusschen aanwezige vloeistof eens en voor altijd vastligt, kan uit een meting van de electrische weerstand van de cel onmiddellijk het geleidingsvermogen van de vloeistof en, met behulp van de ijkkromme in fig. 1, het watergehalte er van worden afgeleid. De weerstandsmeting kan geschieden met een meetbrug, bijv. de speciaal bij dergelijke eenvoudige metingen aangepaste „Philoscop" [3]). Bij de keuze van de ijkkromme moet de temperatuur van het extract, die kan worden afgelezen op een in het molentje aangebrachte thermometer, in acht genomen worden.

Daar het oxaalzuur metalen aantast, moeten alle oppervlakken van het molentje, welke met de extractievloeistof in aanraking komen, behalve de platina-electroden, vervaardigd worden bijv. uit keramisch materiaal, kunsthars of glas.

---

[3]) Zie Philips techn. T. **2**, 270, 1937.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

TRILLINGSVRIJE OPSTELLINGEN MET HULPMASSA

door J. A. HARINGX.

621.752

Het werken met gevoelige instrumenten, zooals balansen, galvanometers, microscopen enz., wordt vaak bemoeilijkt of zelfs onmogelijk gemaakt door trillingen van de omgeving. Om het meetrillen van zoo'n instrument met de omgeving tegen te gaan plaatst men het op voldoend slappe veeren. Men moet dan echter ook een demping aanbrengen om te zorgen, dat het systeem bij kleine stooten of verschuivingen snel genoeg uittrilt. De meest voor de hand liggende manier om de demping aan te brengen, nl. tusschen het apparaat en de fundeering, is wel gunstig voor het snel uittrillen, maar bevordert het meetrillen. Een betere methode bestaat hierin, de demping aan te brengen tusschen het apparaat en een veerend hieraan bevestigde hulpmassa. De eigenschappen van dit systeem en de keuze der verschillende parameters (massa's, veerstijfheden, demping) worden in dit artikel besproken voor het eendimensionale geval.

Verschillende systemen van trillingsvrije opstellingen

Bij het gebruiken van gevoelige instrumenten, zooals balansen, galvanometers, microscopen, meetklokjes enz., ondervindt men vaak last van trillingen der omgeving, die via vloeren, wanden en tafels op deze apparaten worden overgebracht. Men zal in zoo'n geval vragen naar een opstelling waarbij het overbrengen van de trillingen op het instrument in kwestie wordt vermeden. Zeer goede resultaten kunnen worden verkregen door de ondersteuning veerend uit te voeren. Het is echter te eenenmale uitgesloten op deze wijze een opstelling te construeeren die de overdracht van trillingen volkomen verhindert. Wel kan men het meetrillen in een dergelijke mate beperken, dat het meetinstrument van de aanwezige trillingen geen hinder meer ondervindt. In zooverre kan men dan zeggen, dat het instrument „trillingsvrij" is opgesteld.

Brengt men tusschen het instrument en de fundeering een veerende laag aan, bijv. een rubberkussen of een stel schroefveeren, dan verkrijgt men een systeem, zooals schematisch in *fig. 1a* is voorgesteld: een massa m, verbonden door een veer met stijfheid c (d.i. de kracht per eenheid van lengteverandering van de veer) aan een fundeering, die in verticale richting trilt met een hoekfrequentie ω en een amplitude a_0.

Dit systeem gedraagt zich als volgt. De massa m gaat in dezelfde frequentie [1]) ω met de fundeering meetrillen, echter met een amplitude a, die sterk afhangt van deze frequentie. Uit de differentiaalvergelijking voor de beweging van de massa leidt men nl. af, dat:

$$\frac{a}{a_0} = \left| \frac{c}{c - m\omega^2} \right|.$$

In fig. 1*b* is deze „frequentiekarakteristiek" weergegeven. In de buurt van de frequentie

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{c}{m}},$$

de zoogenaamde resonantiefrequentie van het

[1]) Kortheidshalve spreken we hier steeds van „frequentie", waarmee dan (tenzij uitdrukkelijk anders is vermeld) bedoeld wordt de hoekfrequentie $\omega = 2\pi$ maal de frequentie.

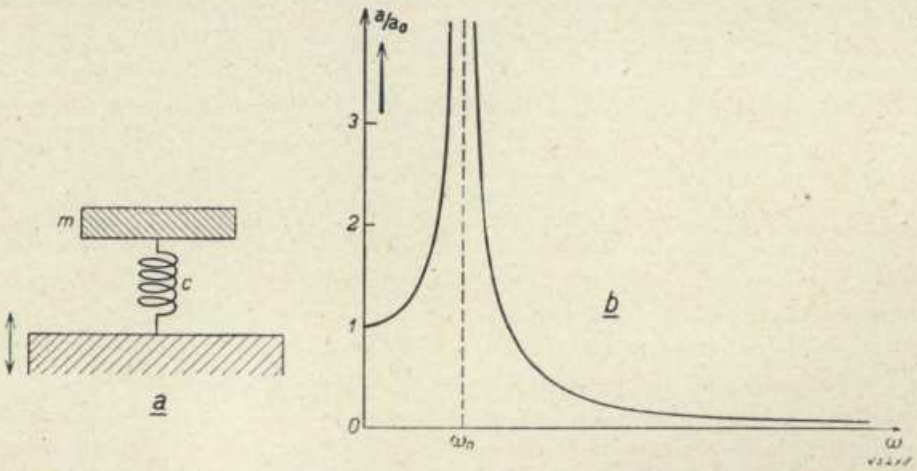


Fig. 1. Schema (*a*) en frequentiekarakteristiek (*b*) van een ongedempte trillingsvrije opstelling. Bij frequenties ω, die ver genoeg boven de resonantiefrequentie ω_0 liggen, is het meetrillen van de massa m met de trillende fundeering sterk gereduceerd. De amplitudeverhouding is $\frac{a}{a_0} = \left| \frac{c}{c - m\omega^2} \right|$.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

systeem, verkrijgt de massa zeer groote amplituden, veel grooter dan a_0. Bij frequenties daarentegen, die voldoende ver boven ω_0 liggen, wordt de amplitude kleiner dan a_0. Bij zeer hooge frequenties daalt zij zelfs geleidelijk tot de grenswaarde nul en wel omgekeerd evenredig met het kwadraat van de frequentie:

$$\frac{a}{a_0} \approx \frac{c}{m\omega^2} = \left(\frac{\omega_0}{\omega}\right)^2 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (1)$$

Is de veer (c) zoo slap en/of de massa (m) zoo groot gekozen, dat de resonantiefrequentie ω_0 minstens 3 à 5 maal zoo laag is als de laagste frequentie welke de storende trillingen van de fundeering kunnen bezitten, dan zal ons instrument deze trillingen slechts in zeer geringe mate meemaken.

Behalve de beperking van het meetrillen in het frequentiegebied der permanent optredende storingen, is het echter ook nog gewenscht, dat de opstelling na een toevallige of met de bediening van het instrument samenhangende stoot of beginuitwijking snel uittrilt. Het systeem volgens fig. 1*a* kan de eenmaal opgenomen trillingsenergie niet meer kwijt raken en heeft theoretisch een oneindig lange tijd voor het uittrillen noodig. Bij de practisch uit te voeren systemen zal echter de trillingsenergie wel geleidelijk-aan verdwijnen, omdat hierbij steeds een zekere demping werkzaam is, al was het slechts de inwendige demping van het materiaal der veeren of de demping door de luchtweerstand. Het is duidelijk, dat het systeem des te sneller zal uittrillen, naarmate deze demping sterker is. Men zal dus geneigd zijn doelbewust een extra demping aan te brengen, op de wijze als in *fig. 2a* is aangegeven. De dempingskracht wordt ondersteld evenredig te zijn met de relatieve snelheid van de massa ten opzichte van de fundeering (visqueuze demping) en de evenredigheidsfactor noemen wij k. Bij het uittrillen neemt dan de amplitude als functie van de tijd t evenredig met $e^{-kt/2m}$ af. Een dergelijke opstelling gedraagt zich nu echter niet alleen wat betreft het uittrillen geheel anders dan de eerst beschouwde, maar ook wat betreft het meetrillen. De in fig. 2*b* voor verschillende waarden van de demping k geteekende frequentiekarakteristieken laten dit duidelijk zien. De resonantiepiek is min of meer gereduceerd, maar tevens verloopt de daling bij hooge frequenties veel geleidelijker dan in fig. 1*b*. Het blijkt namelijk, dat in dit geval de amplitudeverhouding bij hooge frequenties omgekeerd evenredig is met de frequentie:

$$\frac{a}{a_0} \approx \frac{k}{m\omega}.$$

Hoe grooter men dus de demping k maakt, des te sterker wordt weliswaar de resonantiepiek afge-

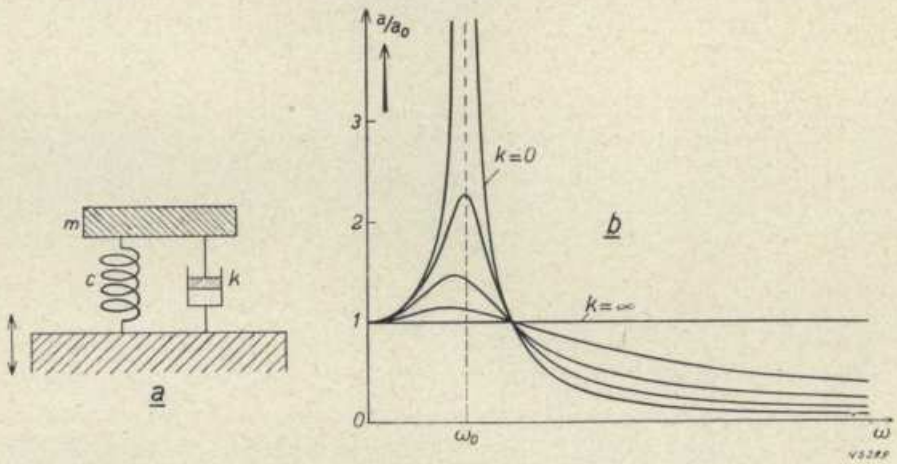


Fig. 2. Schema (*a*) en frequentiekarakteristiek (*b*) van een trillingsvrije opstelling met „relatieve" demping. Met toenemende demping (k) wordt de resonantietop steeds lager en tevens duurt het uittrillen korter, maar het meetrillen bij hooge frequentie is sterker. De amplitudeverhouding wordt gegeven door de volgende uitdrukking [2]):
$\left(\frac{a}{a_0}\right)^2 = \frac{1 + q^2\bar{\omega}^2}{(\bar{\omega}^2 - 1)^2 + q^2\bar{\omega}^2}$, waarin $\bar{\omega} = \frac{\omega}{\omega_0}$, $q = \frac{k}{m\omega_0}$, $\omega_0^2 = \frac{c}{m}$.

knot en des te sneller trilt het systeem na een stoot uit, maar des te minder effectief worden bij hooge frequenties de amplituden gereduceerd; dus zal men dan de resonantiefrequentie des te verder beneden het storende frequentiegebied moeten leggen om het meetrillen in voldoende mate te kunnen beperken.

Daar men echter practisch de resonantiefrequentie niet willekeurig laag kan maken (bij een

[2]) Zie bijv. E. Lehr, Schwingungstechnik, Bd II, p. 171 e.v., J. Springer, Berlijn 1934.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

eventueel gewenschte beperking van de massa zou de opstelling dan te „slap" worden), levert een opstelling volgens het principe van fig. 2*a* in de meeste gevallen geen bevredigende resultaten op: bij geringe demping duurt het uittrillen te lang, bij groote demping wordt het meetrillen niet voldoende beperkt.

Geheel anders zou de zaak worden, indien we de demping niet als in fig. 2*a* zouden aanbrengen tusschen de massa m en de trillende fundeering (relatieve demping), maar tusschen de massa en een vast punt in de ruimte, zg. absolute demping, zie *fig. 3a*. De in fig. 3*b* geteekende frequentiekarakteristieken van dit systeem voor verschillende waarden van de demping toonen, dat hier een vergrooting van de demping in alle opzichten voordeelen heeft. De resonantiepiek wordt sterk afgeknot, terwijl de amplitude ook bij hooge frequenties, dus in het storingsgebied van de fundeering, steeds kleiner blijft dan zij bij de opstelling zonder demping (fig. 1) is, om evenals daar bij voldoend hooge frequenties weer volgens verg. (1) te verloopen. Het verschil in de werking van deze absolute demping en de in fig. 2 aangegeven relatieve demping is gemakkelijk te begrijpen, wanneer men overweegt, dat de tusschen twee punten aangebrachte demping een belemmering van hun relatieve beweging, een oneindig groote demping zelfs een starre koppeling beteekent. Neemt dus in fig. 2*a* de demping toe, dan zal de massa m tenslotte star verbonden zijn met de fundeering en dientengevolge de beweging hiervan geheel op dezelfde wijze meemaken ($a/a_0 = 1$).

Laat men daarentegen in fig. 3*a* de demping toenemen, dan is de massa tenslotte vast verbonden aan een stilstaand punt in de ruimte en blijft dus volmaakt in rust ($a/a_0 = 0$).

Natuurlijk heeft het geval van absolute demping slechts theoretische waarde. Beschikte men immers werkelijk over een vast punt in de ruimte, dan zou het nog wèl zoo verstandig zijn om het trillingsvrij te maken instrument rechtstreeks star daaraan te verbinden in plaats van het met veeren op de trillende fundeering te bevestigen.

Toch kunnen wij, ook zonder over een vast punt te beschikken, de absolute demping tot op zekere hoogte nabootsen. Wij brengen hiertoe het dempingselement (k) aan tusschen de hoofdmassa m en een hulpmassa M, welke via een veer (stijfheid C) aan de hoofdmassa is bevestigd. Deze opstelling is in *fig. 4a* schematisch voorgesteld. Bij hooge frequenties zal de hulpmassa M tengevolge van haar traagheid in het algemeen de neiging hebben om stil te blijven staan en aldus een bijna vast, althans betrekkelijk weinig trillend aangrijpingspunt voor de dempingskracht leveren. Inderdaad wordt deze zienswijze theoretisch bevestigd en blijkt de opstelling, zoowel wat het meetrillen als wat het uittrillen betreft, zeer gunstige eigenschappen te bezitten. Er zijn dan ook in de Philipsfabrieken reeds verschillende trillingsvrije opstellingen volgens dit principe uitgevoerd.

Wij willen nu het gedrag van een systeem

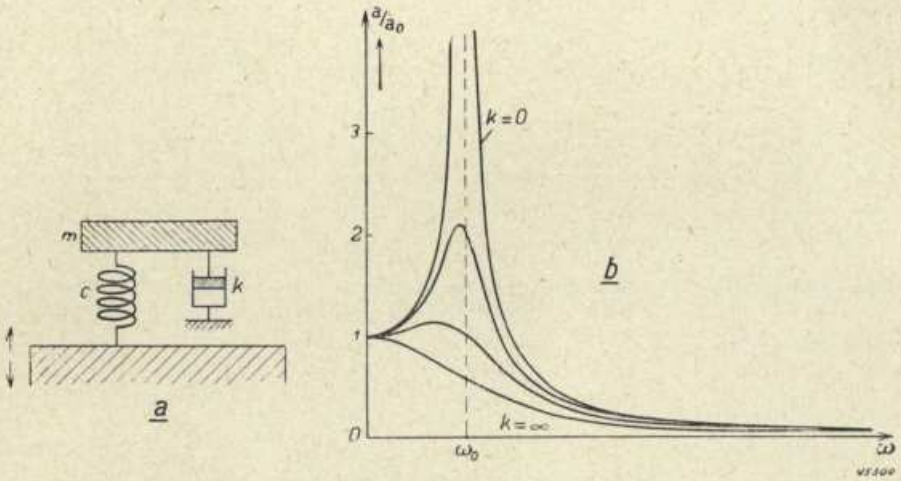


Fig. 3. Schema (*a*) en frequentiekarakteristiek (*b*) van een trillingsvrije opstelling met „absolute" demping. Met toenemende demping (k) wordt niet alleen de resonantiepiek verlaagd en daarmee het uittrillen bekort, maar ook wordt het meetrillen sterker gereduceerd. De amplitudeverhouding wordt gegeven door de volgende uitdrukking [3]):

$$\left(\frac{a}{a_0}\right)^2 = \frac{1}{(\omega^2-1)^2+q^2\omega^2}, \text{ waarin } \omega = \frac{\omega}{\omega_0},\ q = \frac{k}{m\omega_0},\ \omega_0^2 = \frac{c}{m}.$$

[3]) Zie bijv. E. Lehr, Schwingungstechnik, Bd II, p. 135 e.v., J. Springer, Berlijn 1934.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

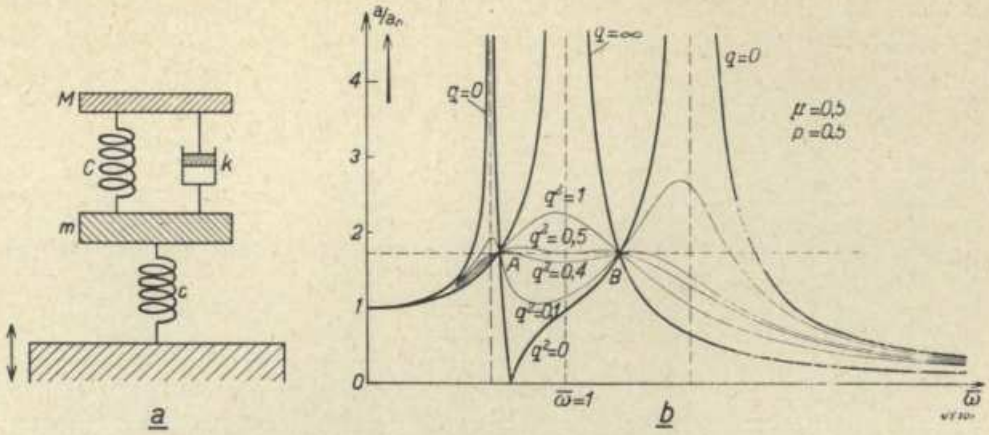


Fig. 4. Schema (*a*) en frequentiekarakteristiek (*b*) van een trillingsvrije opstelling met hulpmassa M. De demping k is tusschen hoofdmassa (m) en hulpmassa aangebracht. De amplitudeverhouding wordt gegeven door formule (3) op pag. 20. De figuur is hier geteekend voor het bijzondere geval, dat $\mu = 0{,}5$ en $p = 0{,}5$ is, waarbij de snijpunten A en B van alle frequentiekarakteristieken even hoog komen te liggen.

volgens fig. 4*a* nader onderzoeken en de keuze van de diverse parameters (m, c, M, C, k) bespreken. Hierbij zullen we ons beperken tot het eendimensionaal geval.

Het gedrag van het systeem met hulpmassa in afhankelijkheid van de parameters

De frequentiekarakteristiek

De gedaante van de frequentiekarakteristiek is voor een bepaald geval bij verschillende waarden van de demping in fig. 4*b* opgeteekend. Om deze figuur nader te analyseeren beginnen we met het grensgeval te beschouwen, dat de demping k oneindig groot is. Dan is de hulpmassa M star verbonden aan de hoofdmassa m; we hebben dus feitelijk een systeem zooals in fig. 1, met veerstijfheid c en massa $m + M$. De frequentiekarakteristiek van dit systeem is de getrokken kromme in *fig.* 5 (identiek met fig. 1*b*), met de resonantiefrequentie:

$$\omega_0 = \sqrt{c/(m + M)}.$$

Daar als abscis $\bar{\omega} = \omega/\omega_0$ is uitgezet, treedt de resonantie op bij $\bar{\omega} = 1$.

Is daarentegen de demping $k = 0$, dan hebben we te maken met het bekende geval van twee gekoppelde, ongedempte oscillatoren. Een dergelijk systeem met twee vrijheidsgraden komt bij twee verschillende frequenties in resonantie, heeft derhalve een frequentiekarakteristiek zooals de gestippelde kromme in fig. 5. De juiste ligging der beide aan weerszijden van ω_0 ($\bar{\omega} = 1$) gelegen resonantiefrequenties, alsmede van het daartusschen gelegen nulpunt P der kromme, hangt af van de parameters (massa's en veerstijfheden) van het systeem.

In het algemeene geval tenslotte, waarbij de demping k een waarde tusschen 0 en ∞ heeft, krijgt men voor de frequentiekarakteristiek een kromme die altijd door de beide snijpunten A en B der twee eerstbeschouwde grenskrommen loopt en overigens geheel tusschen deze beide krommen in ligt, in het algemeen hetzij met één maximum tusschen A en B, hetzij met twee maxima, nl. aan weerszijden van A en B. Zie de krommenschaar in fig. 4*b*.

Het is misschien niet onaardig en voor het vervolg nuttig om één en ander aan de hand van formules wat nader toe te lichten. De afleiding hiervan willen we slechts kort schetsen [4]). Door de krachten te beschouwen, die op hoofd- en hulpmassa werken, krijgt men voor de beweging der beide massa's twee gekoppelde lineaire differentiaalvergelijkingen van de tweede orde, waaruit door eliminatie van de coördinaat der hulpmassa een lineaire differentiaalvergelijking van de vierde orde wordt verkregen voor de coördinaat x van de hoofdmassa. Trilt nu de fundeering volgens $a_0 \sin \omega t$, dan zal de hoofdmassa een gedwongen trilling met dezelfde frequentie doch in het algemeen met een andere amplitude en fase uitvoeren: $x = a \sin(\omega t + \varphi)$. Door dit in de differentiaalvergelijking te substitueeren, kan men een vergelijking afleiden voor de frequentiekarakteristiek, nl. voor de verhouding a/a_0 als functie van ω en van de parameters m, c, M, C, k. Deze grootheden blijken echter in het resultaat slechts in bepaalde com-

[4]) Vgl. hiertoe ook J. P. den Hartog, Vibrations et mouvements vibratoires, p. 99, uitg. Dunod, Parijs 1936; E. Hahnkamm, Die Dämpfung von Fundamentschwingungen bei veränderlicher Erregerfrequenz, Ing. Arch. **4**, 192, 1933; L. Geislinger, Theorie des Resonanzschwingungsdämpfers, Ing. Arch. **5**, 146, 1934.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

binaties voor te komen, zoodat we het resultaat aanmerkelijk eenvoudiger kunnen schrijven en beter overzien door de volgende (dimensielooze) grootheden in te voeren:

$$\left.\begin{aligned} \bar{\omega} &= \frac{\omega}{\omega_0} = \omega \sqrt{\frac{m+M}{c}}, \\ p &= \frac{C}{c}\,\frac{m+M}{M}, \\ q &= \frac{k}{M}\sqrt{\frac{m+M}{c}}. \\ \mu &= \frac{m}{m+M}, \end{aligned}\right\} \quad \ldots \quad (2)$$

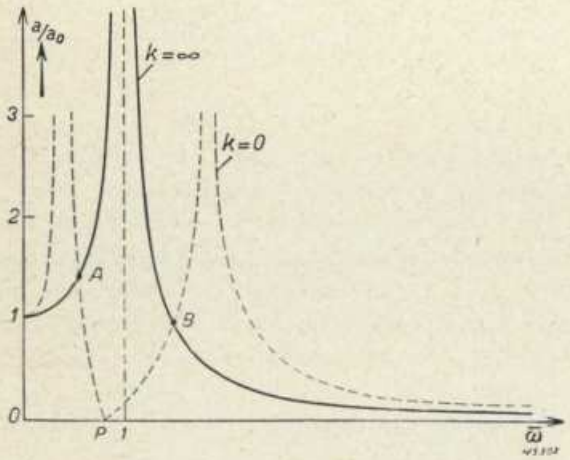


Fig. 5. Frequentiekarakteristiek van het systeem met hulpmassa (fig. 4*a*) in de beide extreme gevallen van demping $k = \infty$ en $k = 0$. In het eerste geval zijn hoofdmassa en hulpmassa star verbonden en hebben we een systeem als in fig. 1*a* (getrokken kromme), in het tweede geval hebben we te maken met een samenstel van twee gekoppelde (ongedempte) trillingssystemen. Overeenkomstig de twee vrijheidsgraden zijn er dan twee resonantiefrequenties (gestippelde kromme). $\bar{\omega} = \omega/\omega_0$ is de gereduceerde frequentie.

De grootheid p zullen we de stijfheidsparameter noemen, q de dempingsparameter, μ de massaparameter. De formule voor de frequentiekarakteristiek wordt nu:

$$\left(\frac{a}{a_0}\right)^2 = \frac{(\bar{\omega}^2 - p)^2 + q^2\bar{\omega}^2}{[\mu\bar{\omega}^4 - (1+p)\,\omega^2 + p]^2 + q^2\bar{\omega}^2(\bar{\omega}^2-1)^2}. \quad (3)$$

In het geval van oneindig groote demping wordt $q = \infty$ en de formule gaat over in:

$$\left(\frac{a}{a_0}\right)_{q=\infty} = \left|\frac{1}{\bar{\omega}^2 - 1}\right| \quad \ldots \quad (4)$$

Dit is de getrokken kromme in fig. 5. In het geval zonder demping, dus $q = 0$, gaat de formule over in:

$$\left(\frac{a}{a_0}\right)_{q=0} = \left|\frac{\bar{\omega}^2 - p}{\mu\bar{\omega}^4 - (1+p)\,\bar{\omega}^2 + p}\right|,$$

hetgeen de vergelijking is voor de gestippelde kromme in fig. 5.

Noemen we nu de functies van $\bar{\omega}$, die in de vier termen van teller en noemer van (3) voorkomen, gemakshalve even α, β, γ, δ, dan kunnen we voor (3) schrijven:

$$\left(\frac{a}{a_0}\right)^2 = \frac{\alpha + q^2\beta}{\gamma + q^2\delta} = \frac{\alpha\,(1 + q^2 \cdot \beta/\alpha)}{\gamma\,(1 + q^2 \cdot \delta/\gamma)}$$

en we zien direct, dat onder de voorwaarde

$$\frac{\beta}{\alpha} = \frac{\delta}{\gamma} \quad \ldots \quad (5)$$

het quotient $(a/a_0)^2 = \alpha/\gamma$ wordt, dus onafhankelijk van q. Bij die waarden van $\bar{\omega}$, waarvoor aan (5) is voldaan, hebben dus de krommen voor alle waarden van q, o.a. ook voor $q = 0$ en $q = \infty$, dezelfde ordinaat, waaruit volgt, hetgeen reeds werd beweerd, dat alle krommen gaan door de beide snijpunten A en B van de getrokken en de gestippelde krommen in fig. 5.

Voor de abscissen ω_A en ω_B dezer snijpunten, die we straks nog noodig zullen hebben, kunnen we door substitueeren der vier functies $\alpha \ldots \delta$ in (5) de vergelijking afleiden:

$$\bar{\omega}^4 - 2\,\frac{1+p}{1+\mu}\,\bar{\omega}^2 + 2\,\frac{p}{1+\mu} = 0,$$

dus:

$$(\bar{\omega}^2)_{A,B} = \frac{1}{1+\mu}\,(1 + p \pm \sqrt{p^2 - 2p\,\mu + 1}), \quad (6)$$

waarbij:

$$\bar{\omega}_A < 1 \text{ en } \bar{\omega}_B > 1.$$

Voor de ordinaten der snijpunten vindt men dan volgens (4):

$$\left(\frac{a}{a_0}\right)_A = \frac{1}{1 - \bar{\omega}_A^2} \quad \text{en} \quad \left(\frac{a}{a_0}\right)_B = \frac{1}{\bar{\omega}_B^2 - 1}. \quad (7)$$

Het gedrag bij hooge frequenties

Uit de algemeene gedaante der krommen in fig. 4*b* ziet men, dat men ook bij dit soort systemen het resonantiegebied in ieder geval ver beneden het frequentiegebied der storende trillingen van de fundeering zal moeten leggen. In hoeverre dan het meetrillen van de hoofdmassa wordt beperkt, is zonder moeite uit verg. (3) af te leiden. Voor voldoend hooge frequenties gaat deze over in:

$$\left|\frac{a}{a_0}\right| \approx \frac{1}{\mu\bar{\omega}^2} = \frac{c}{m\omega^2} \quad \ldots \quad (8)$$

Vergelijken we (8) met (1), dan zien we, dat we bij gelijke c en m hetzelfde gunstige gedrag krijgen als bij de elementaire opstelling geheel zonder demping (fig. 1), resp. die met absolute demping

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

(fig. 3). De aanwezigheid van de hulpmassa M speelt hier dus blijkbaar geen rol.

Dit gedrag voorspelden we hierboven reeds kwalitatief uit de neiging van de hulpmassa M om bij hooge frequenties te blijven stilstaan.

In werkelijkheid beweegt M natuurlijk toch nog een weinig, en wel kan men afleiden, dat de amplitude a' hiervan bij hooge frequenties wordt vastgelegd door: $|a'/a_0| \approx kc/mM\omega^3$. De verhouding a'/a_0 daalt dus sneller met toenemende ω dan de amplitudeverhouding voor de hoofdmassa volgens formule (8).

De gunstigste keuze der parameters

Bij de practische uitvoering van een trillingsvrije opstelling volgens fig. 4 zal vanzelf de vraag rijzen, hoe stijf de veeren, hoe zwaar de massa's en hoe sterk de demping moeten worden gemaakt. Het gedrag bij hooge frequenties, verg. (8), levert hiervoor de reeds bekende aanwijzing, dat het resonantiegebied van het systeem bij zoo laag mogelijke frequenties moet worden gelegd. Voor wat betreft de keuze van C, M en k worden we hieruit niet wijzer, daar deze parameters blijkens verg. (8) het meetrillen met de hooge stoorfrequenties niet raken. Wel zal de keuze van deze parameters de doorslag geven voor het gedrag bij lagere frequenties en voor het uittrillen van het systeem na een toevallige stoot of beginuitwijking.

Bij het uittrillen is de beweging van het systeem in het algemeen samengesteld uit twee trillingen met de beide „resonantiefrequenties", waarbij de amplitude van ieder dezer trillingen met de tijd daalt volgens een eigen e-macht: $e^{-\alpha_1 t}$, resp. $e^{-\alpha_2 t}$, en waarbij de onderlinge verhouding der beginamplituden van beide trillingen afhangt van de beginvoorwaarden (beginuitwijking of stoot). De uittriltijd zal dus behalve van α_1 en α_2 tevens afhangen van de toevallige beginvoorwaarden. Men kan derhalve niet van „de" uittriltijd van het systeem spreken en zelfs al geeft men de beginvoorwaarden aan, dan is de invloed der parameters van het systeem op het uittrillen toch zeer moeilijk na te gaan. Wanneer we echter onderstellen, dat het beperken van de uittriltijd, op overeenkomstige wijze als bij de systemen met één massa (fig. 2 en 3), ook hier min of meer evenwijdig loopt met een beknotten van de amplituden van het systeem in het resonantiegebied, dan moeten we uit dien hoofde de frequentiekarakteristiek bij de lagere frequenties nader bestudeeren. We zouden dan als eisch kunnen stellen, dat de grootste top in de frequentiekarakteristiek zoo laag mogelijk wordt, om hieruit de geschiktste keuze der parameters af te leiden.

Onder de krommen met verschillende waarden van de dempingsparameter q zal er één zijn, waarbij de hoogste top juist in het hoogst gelegene der beide punten A en B komt te liggen. Bij gegeven ligging van A en B is dit klaarblijkelijk de gunstigste mogelijkheid, omdat dan nergens de ordinaat van punt A, resp. punt B, wordt overschreden. De bij deze kromme behoorende q-waarde kennen wij weliswaar nog niet, doch dat doet aan onze beschouwing niets af. Aan de hand van fig. 5 gaan we nu de ligging van A en B na. De getrokken kromme ($q = \infty$), waarvoor verg. (4) geldt, ligt geheel vast, zoodra we de resonantiefrequentie ω_0 als gegeven beschouwen. De punten A en B zullen dus steeds op deze kromme liggen en men kan aan de hand van formule (6) bewijzen, dat wanneer we de parameter p varieeren beide punten naar rechts of beide naar links verschuiven. Uit fig. 5 ziet men, dat derhalve steeds het ééne punt stijgt als het ander daalt en omgekeerd. De hoogste top van de frequentiekarakteristiek kunnen we dan ook aanmerkelijk lager maken dan in fig. 5 door aan p een zoodanige waarde te geven, dat de punten A en B even hoog komen te liggen, zooals in fig. 4*b* het geval is. Weliswaar vertoont de gunstigste frequentiekarakteristiek dan twee even hoog gelegen maxima, die noch met A noch met B samenvallen, maar de verschillen zijn zoo uitermate gering, dat we langs deze weg een zeer goede benadering bereiken. Uit (7) volgt, dat A en B even hoog liggen, wanneer voldaan wordt aan de voorwaarde:

$$\bar{\omega}_A^2 + \bar{\omega}_B^2 = 2.$$

Substituceeren we hierin de uitdrukking (6) voor $\bar{\omega}_A$ en $\bar{\omega}_B$, dan krijgen we als „gunstigste" waarde voor de stijfheidsparameter:

$$p_{\text{opt}} = \mu.$$

Voor de bijbehoorende maximale amplitudeverhouding vinden we:

$$\left(\frac{a}{a_0}\right)^2_{\text{opt}} \approx \left(\frac{a}{a_0}\right)^2_{A,B} = \frac{1+\mu}{1-\mu} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (9)$$

Vervolgens kan, uitgaande van de berekeningen van Collatz [5]), worden aangetoond, dat de gunstigste waarde van de dempingsparameter met zeer goede benadering gelijk is te stellen aan:

$$q_{\text{opt}} \approx \sqrt{1{,}5\,\mu(1-\mu)}.$$

Practisch belangrijk geval: massaparameter $\mu = 0{,}5$

Door het bovenstaande is het probleem van de

[5]) L. Collatz, Ueber den günstigsten Wert der Kopplungskonstanten bei reibungsgekoppelten Systemen, Ing. Arch. **10**, 269, 1939.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

keuze der parameters teruggebracht tot de keuze van de massaparameter: $\mu = m/(m+M)$. Daar wij de frequentiekarakteristiek zoo laag mogelijk trachten te doen loopen, moeten we de grootste thans optredende ordinaat zoo klein mogelijk zien te maken. Blijkens verg. (9) is hiervoor een zoo klein mogelijke waarde van μ gewenscht, dwz. in onze trillingsvrije opstelling zou de hulpmassa M groot moeten zijn ten opzichte van de hoofdmassa m. Practisch zal men M niet gaarne grooter maken dan de hoofdmassa zelf. Onderstellen we daarom, dat de beide massa's even groot gekozen worden, dus $\mu = 0{,}5$, dan krijgen we:

$$p_{opt} = \mu = 0{,}5,$$

$$q_{opt} \approx \sqrt{1{,}5\ \mu\ (1-\mu)} = 0{,}612,$$

In verband met verg. (2) blijkt vervolgens te moeten worden voldaan aan de betrekkingen:

$$C/c = \mu(1-\mu) = 0{,}25,$$

$$\frac{k}{\sqrt{mc}} \approx (1-\mu)\sqrt{1{,}5\ (1-\mu)} = 0{,}433.$$

Tenslotte bedraagt de maximale amplitudeverhouding volgens verg. (9) slechts:

$$\left(\frac{a}{a_0}\right)_{opt} \approx \sqrt{\frac{1+\mu}{1-\mu}} = 1{,}728.$$

Daar bij $p = \mu = 0{,}5$ exact geldt [5]), dat

$$\varsigma_{opt} = 0{,}624 \text{ en } (a/a_0)_{opt} = 1{,}746$$

s, blijken de gegeven benaderingen zeer goed te zijn. Trouwens, zelfs al maken we de dempingsparameter aanzienlijk te groot of te klein, dan varieert $(a/a_0)_{max}$ nog maar weinig; de toename ten opzichte van de gunstigste waarde (1,75) bedraagt tusschen $q = 0{,}4$ en $q = 0{,}95$ hoogstens 25%. Iets dergelijks geldt voor de keuze van p. Houden we vast aan $\mu = 0{,}5$ en nemen we telkens de beste waarde van q, dan heeft een variatie van p tusschen 0,3 en 0,7 eveneens hoogstens een stijging van 25% in $(a/a_0)_{max}$ tengevolge.

We vergelijken nu deze gunstigste resultaten van onze opstelling met hulpmassa met die van de trillingsvrije opstellingen zonder hulpmassa. We onderstellen hierbij de totale massa $m + M$ resp. m en de veerstijfheid c als gegeven, aangezien men bij de practische constructie er in het algemeen van zal moeten uitgaan, dat een bepaald gewicht ter beschikking wordt gesteld en bovendien wordt geëischt, dat de veerende bevestiging van de hoofdmassa een zekere stijfheid bezit. De resonantiefrequenties

$$\omega_0 = \sqrt{c/(m+M)} \text{ resp. } \omega_0 = \sqrt{c/m}$$

zijn dan automatisch aan elkaar gelijk, zoodat voor willekeurige ω de gereduceerde frequenties $\bar{\omega} = \omega/\omega_0$ in beide gevallen steeds even groot zijn. In *fig. 6* hebben we nu ter vergelijking bijeengebracht:

1) de frequentiekarakteristiek van de ongedempte opstelling volgens fig. 1*a*;
2) die van de opstelling met hulpmassa volgens fig. 4*a* met dezelfde veerstijfheid c en dezelfde, in twee gelijke deelen gesplitste, totale massa; dus $\mu = 0{,}5$ en voorts $p = 0{,}5$; $q = 0{,}62$;
3) die van de opstelling volgens fig. 2*a* met relatieve demping, bij dezelfde veerstijfheid en massa, en een zoodanige waarde van de demping ($q = k/m\omega_0 = 0{,}74$) dat het maximum van de frequentiekarakteristiek even laag komt te liggen als dat van kromme 2.

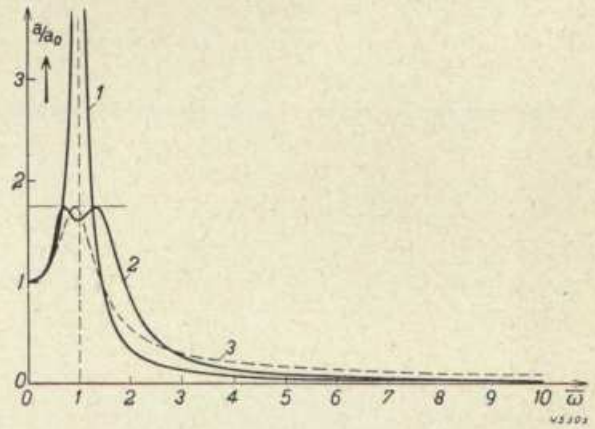


Fig. 6. Frequentiekarakteristieken van een ongedempt trillingssysteem (kromme *1*), een systeem met hulpmassa bij de „gunstigste" keuze der parameters voor $\mu = 0{,}5$ (kromme *2*) en een systeem met relatieve demping (kromme *3*). Bij alle drie systemen is er van uitgegaan, dat de totale massa dezelfde is en eveneens de veerstijfheid c. Verder is voor kromme *3* de demping zoo gekozen, dat de maximale amplitudeverhouding dezelfde is als in geval *2*.

Men ziet in geval (3) duidelijk het veel ongunstiger verloop van de frequentiekarakteristiek bij hooge frequenties [6]). Bovendien heeft de laatstgenoemde opstelling de ongewenschte eigenschap, dat een toevallige vergrooting van de dempingscoëfficient k (bijv. bij visqueuze demping tengevolge van een temperatuurdaling) de massa met een evenredig grootere amplitude doet meetrillen, waardoor de „trillingsvrijheid" van de opstelling voor een groot deel verloren kan gaan. Bij toepassing van een hulpmassa daarentegen wordt het meetrillen bij hooge frequenties niet of althans niet merkbaar door de demping beïnvloed, terwijl, zooals we zagen, ook de maximale amplitudeverhouding in het resonantiegebied

[6]) Want $a/a_0 \approx km/\omega = q/\bar{\omega}$ in plaats van $a/a_0 = 1/\bar{\omega}^2$ resp. $1/\mu\bar{\omega}^2$.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

slechts in geringe mate op een verandering van de demping reageert.

Het uittrillen

Om de moeilijkheden te ontgaan, welke zich voordoen bij het bestudeeren van de invloed der parameters op het gedrag van de opstelling met hulpmassa bij het uittrillen na een stoot of beginuitwijking, stelden we ons gemakshalve op het standpunt, dat parallel met het beknotten van de amplitude bij resonantie ook de uittriltijd zou worden beperkt en stuurden we dus aan op een zoo laag mogelijk maximum van de frequentiekarakteristiek. Zijn alle parameters echter eenmaal gekozen, dan is het uittrillen zonder meer exact na te gaan. Voor het geval $m = M$ met de bijbehoorende „gunstigste" waarden $p = 0{,}5$ en $q = 0{,}62$ vinden we, dat het uittrillen van onze hoofdmassa na een bepaalde beginuitwijking verloopt volgens *fig. 7*.

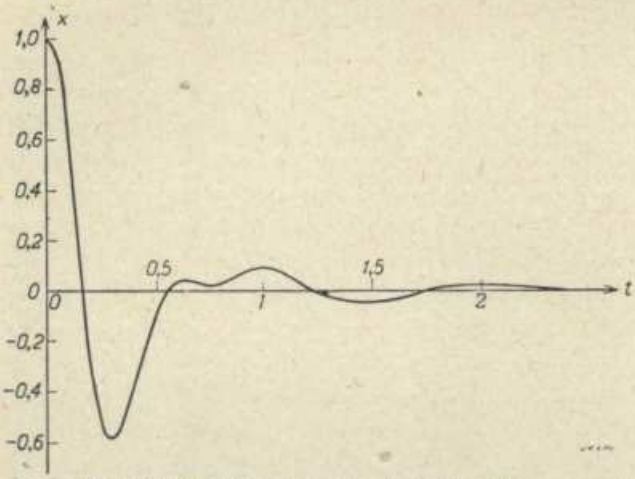


Fig. 7. Het uittrillen bij een gegeven beginuitwijking voor een systeem volgens fig. 4*a*, met $\mu = 0{,}5$ en de „gunstigste" parameters $p = 0{,}5$ en $q = 0{,}62$.

Reeds na de eerste slingering is de uitwijking gedaald tot op 1/10 van de beginuitwijking, terwijl na twee slingeringen nog slechts $1^1/_2\%$ van de amplitude is overgebleven. Dit zeer gunstige gedrag geeft eenige zekerheid, dat onze keuze der parameters goed is, al mogen we natuurlijk niet meenen ten opzichte van het uittrillen de allergunstigste voorwaarden te hebben gevonden [7]).

Gaan we bij dezelfde beginvoorwaarden het uittrillen van het elementaire systeem met relatieve demping en met hetzelfde maximum in de frequentiekarakteristiek na (geval (3)), dan vinden we, dat hierbij het uittrillen ongeveer anderhalf maal zoo snel plaats vindt.

Wanneer men de hier ontwikkelde theorie in de practijk wil gebruiken voor het construeeren van trillingsvrije opstellingen, dan komt men direct voor het probleem te staan, dat de fundeering van een apparaat in den regel trillingen in verschillende richtingen zal kunnen uitvoeren. Dit meer algemeene geval zullen we in een volgend artikel in dit tijdschrift bespreken, waarin dan tevens de practische uitvoering nader zal worden behandeld.

[7]) Een nadere beschouwing leert bijv., dat in het algemeen bij $p = \mu$ en $q \approx \frac{1}{4}\mu(1-\mu)$ het uittrillen nog wat sneller plaats vindt dan bij onze „gunstigste" parameterwaarden $p = \mu$ en $q \approx \frac{1}{1{,}5}\mu(1-\mu)$. Deze beschouwingen, die hier te ver zouden voeren, hopen wij elders te publiceeren.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

VERSTERKERS MET CONSTANTE VERSTERKING

door J. J. ZAALBERG van ZELST.

621.394.645.3

De versterkingsgraad van een versterker hangt, bij een gegeven frequentie, af van de eigenschappen der gebruikte buizen (en wel in het bijzonder van de steilheid) en van de impedanties der overige schakelelementen. Aangenomen dat deze laatste dank zij een doelmatige constructie en materiaalkeus als voldoende constant mogen worden beschouwd, blijft de vraag, zoodanige schakelingen te ontwerpen, dat de versterking in zoo gering mogelijke mate afhankelijk wordt van de buiseigenschappen, die kunnen varieeren met de grootte der voedingsspanningen, met de temperatuur, contactpotentialen enz., of bij uitwisseling tegen een ander buisexemplaar. Voor meetdoeleinden o.a. is dit uiteraard van groot belang. In dit artikel worden twee groepen van schakelingen besproken, die ieder in twee ondergroepen kunnen worden verdeeld en die in hooge mate constante versterking kunnen leveren. Bij sommige dezer methoden zijn slechts weinig extra-onderdeelen noodig. Als bijkomstig voordeel kan soms een verminderde vervorming geboekt worden. De verschillende methoden laten zich in vele gevallen ook combineeren, waardoor dan een buitengewoon constante versterking wordt bereikt.

Inleiding

Het is in vele gevallen, bijv. voor meetdoeleinden, gewenscht, de beschikking te hebben over een versterker waarvan de versterking niet met de tijd verloopt, ook al varieeren verschillende grootheden, zooals voedingsspanningen, contactpotentialen, temperaturen enz., die direct of indirect de versterking kunnen beïnvloeden. Men moet deze eisch niet te letterlijk opvatten; het is voldoende dat, indien deze grootheden binnen zekere redelijke grenzen blijven — grenzen, die in de practijk slechts in uitzonderingsgevallen zullen worden overschreden —, ook de versterking binnen bepaalde grenzen blijft, die zoo nauw zijn dat men de afwijking van de nominale waarde voor het gestelde doel kan verwaarloozen. In dit artikel bespreken wij een paar principes die bij het ontwerp van een zoodanige versterker van belang kunnen zijn. Wij beperken ons hierbij tot die gevallen waarin de versterkende werking wordt verkregen doordat de te versterken wisselspanning tusschen een tweetal electroden van een buis (kathode en stuurrooster bijv.) aanleiding geeft tot een stroom van dezelfde frequentie naar een andere electrode der buis (bijv. de anode). Wij beschouwen alleen de invloed die de variaties der buiseigenschappen op de versterking uitoefenen, daar de veranderingen van de overige schakelelementen meestal door geschikte constructie of materiaalkeuze binnen voldoend nauwe grenzen kunnen worden gehouden.

Bij iedere buis of ieder complex van buizen bestaat, in de situatie zooals die in een versterker voorkomt, een zekere verhouding tusschen de teweeggebrachte wisselstroom en de aangelegde wisselspanning, een verhouding die wel eenigszins, maar bij de gebruikelijke orden van grootte slechts in geringe mate van de amplitude afhangt. Deze verhouding zal in het volgende, met een kleine generalisatie van de gebruikelijke beteekenis van het woord, kortheidshalve met steilheid (symbool S) worden aangeduid. De eigenlijke versterking, d.i. de verhouding van de uitgangsspanning tot de ingangsspanning, is evenredig met deze steilheid.

De methoden ter verbetering van de constantheid der versterking kunnen in twee groepen worden ingedeeld. Bij de eerste groep behouden de buizen hun door de omstandigheden gegeven steilheid; de betere constantheid der versterking wordt bereikt door een corrigeerend bedrag aan het ingangs- of het uitgangssignaal toe te voegen. Dit toevoegen kan buiten de versterker worden uitgevoerd, en er behoeft niet in de versterker te worden ingegrepen. Onder deze groep vallen:

Ia) de terugkoppeling: een gedeelte van het uitgangssignaal wordt aan de ingang extra toegevoegd en meeversterkt;

Ib) het ingangssignaal wordt met een deel van het uitgangssignaal vergeleken en het verschil wordt, na in een extra-versterker te zijn versterkt, aan het uitgangssignaal toegevoegd.

Bij de tweede groep wordt de instelling van de buizen zoo geregeld dat de steilheid constant blijft. Hierbij maakt men gebruik van een regelspanning, die afgeleid wordt uit een hulpwisselspanning van een niet-storende frequentie. Al naar de oorsprong van deze hulpspanning kan men twee gevallen onderscheiden:

IIa) zij wordt van buiten af aan de versterker toegevoerd;

IIb) zij wordt in de versterker zelf opgewekt.

Wij zullen deze methoden nu afzonderlijk nader beschouwen.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Ia) Toevoeging van een corrigeerend bedrag aan het ingangssignaal (terugkoppeling)

Over terugkoppeling, en in het bijzonder over de speciale vorm hiervan die met tegenkoppeling wordt aangeduid en die wij hier voornamelijk op het oog hebben, is reeds veel geschreven, ook in dit tijdschrift [1]). Niettemin moge hier het principe in het kort in herinnering worden gebracht.

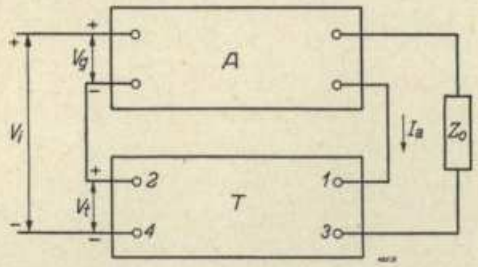


Fig. 1. Van een versterker A wordt de uitgangswisselstroom I_a toegevoerd aan de ingangsklemmen *1-3* van een terugkoppelnetwerk T. Aan de uitgangsklemmen *2-4* hiervan ontstaat dientengevolge een spanning V_t, die tezamen met het ingangssignaal V_i de aan A toegevoerde spanning V_g vormt. De teekens + en — bij de klemmen geven aan, in welke richting de wisselspanningen V_i, V_t en V_g positief gerekend worden. Z_0 is een uitwendige impedantie.

Van een versterker A (*fig. 1*) wordt de uitgangsstroom I_a (of eventueel de uitgangsspanning, of een deel hiervan) aan een netwerk T, het terugkoppelnetwerk, toegevoerd. De uitgangsspanning V_t van dit netwerk vormt, tezamen met het te versterken signaal V_i, de ingangsspanning V_g van de versterker. Van tegenkoppeling spreekt men, als het faseverschil tusschen V_i en V_t zoodanig is dat de amplitude van V_g kleiner is dan die van V_i.

De versterker A moge gekarakteriseerd zijn door de steilheid S:

$$I_a = SV_g, \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (1)$$

het terugkoppelnetwerk T door een overdrachtsimpedantie Z:

$$V_t = ZI_a = (R + jX)\, I_a \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (2)$$

Van het netwerk T kunnen de klemmen *1* en *2* samenvallen; evenzoo de klemmen *3* en *4*. In dat geval is Z eenvoudig de tusschen de twee punten *1-2* en *3-4* geschakelde impedantie. In ingewikkelder gevallen is het netwerk, zooals in fig. 1 aangegeven, een vierpool en wordt met Z de verhouding van de uitgangsspanning tot de ingangsstroom van deze vierpool bedoeld; men spreekt dan van een overdrachtsimpedantie.

Ten slotte bestaat nog, bij de in fig. 1 aangegeven positieve richting der spanningen, de betrekking

$$V_g = V_i - V_t \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (3)$$

[1]) Philips techn. T. **1**, 268, 1936 en **2**, 289, 1937.

Zonder terugkoppeling ($Z = 0$, dus $V_t = 0$) is de steilheid S' van het geheel identiek met die van de versterker zelf:

$$S' = \frac{I_a}{V_i} = \frac{I_a}{V_g} = S.$$

In het geval van terugkoppeling vinden we echter:

$$S' = \frac{I_a}{V_i} = \frac{SV_g}{V_i} =$$

$$= S\,\frac{V_i - V_t}{V_i} = S\,(1 - \frac{ZI_a}{V_i}) = S\,(1 - ZS')$$

of

$$S' = \frac{1}{Z + \frac{1}{S}} = \frac{1}{\frac{1}{S} + R + jX},$$

dus

$$|S'| = S_{eff} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{S} + R\right)^2 + X^2}}, \quad . \quad . \quad (4)$$

als wij $|S'|$ met S_{eff} aanduiden.

De vraag is nu, hoe R en X het best gekozen kunnen worden, opdat gegeven variaties van S slechts weinig invloed op S_{eff} uitoefenen, zonder dat deze laatste grootheid aanmerkelijk kleiner wordt dan de oorspronkelijke steilheid S. Hierbij bedenke men nog dat de componenten R en X van de overdrachtsimpedantie Z negatief kunnen zijn, terwijl de vierpool T toch geen negatieve weerstanden, zelfinducties of capaciteiten behoeft te bevatten (wij zullen hiervan aanstonds een voorbeeld geven). Dit overwegende, zal men trachten aan R een zoodanige negatieve waarde te geven dat deze de gemiddelde waarde van $1/S$ juist compenseert. Stel, S varieert, door welke oorzaak dan ook, tusschen de grenzen $S_{\min}$ en $S_{\max}$; men kieze dan

$$R = -\tfrac{1}{2}\left(\frac{1}{S_{\max}} + \frac{1}{S_{\min}}\right) \quad . \quad . \quad . \quad (5)$$

Door deze keuze laat men immers de eerste term in de noemer van (4) zoo goed mogelijk verdwijnen, waarmee men bereikt 1) dat variaties van S — welke grootheid alleen in deze term voorkomt — een zoo gering mogelijke invloed hebben, en 2) dat de noemer van (4), bij een gegeven waarde van X, zoo klein mogelijk, dus de versterking zoo groot mogelijk wordt.

Door substitutie van (5) in (4) vindt men dat de effectieve steilheid zal liggen tusschen de grenzen

$$S_{eff\,\max} = \frac{1}{|X|}$$

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

en $$S_{eff\,min} = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{4}\left(\frac{1}{S_{min}} - \frac{1}{S_{max}}\right)^2 + X^2}} \quad (6)$$

Deze variatie kan men relatief zoo klein maken als men wil door $|X|$ slechts groot genoeg te nemen; echter wordt de versterking kleiner, naarmate $|X|$ grooter wordt. Men kan hier dus het compromis zoeken dat in een bepaald geval het beste voldoet. Bij een voldoend lage waarde van $|X|$ wordt S_{eff} grooter dan de oorspronkelijke S. Al naar gelang S_{eff} grooter of kleiner dan S is, heeft men met positieve of meewerkende terugkoppeling, dan wel met negatieve terugkoppeling of tegenkoppeling te maken. Zooals men met behulp van (6) kan berekenen, gaat bij gebruik van tegenkoppeling de opoffering aan versterking gepaard met een groote winst in constantheid; bij zwakke positieve terugkoppeling is deze winst minder groot en gaat bij sterke terugkoppeling zelfs in een verlies over. Wij zullen dit aan een concreet voorbeeld toelichten.

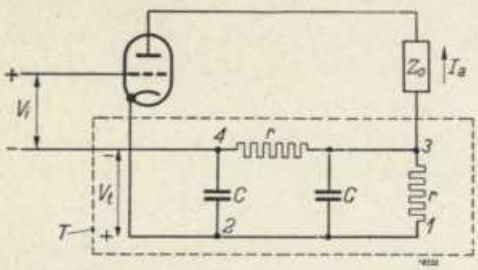


Fig. 2. Voorbeeld (zie noot [2]) van een versterker met terugkoppelnetwerk T, dat hier bestaat uit twee weerstanden r en twee condensatoren C. De nummering *1-4* der klemmen van T komt overeen met die van fig. 1.

Fig. 2 toont het schema [2]) van een versterker waarin het terugkoppelnetwerk uit de aangegeven combinatie van twee weerstanden en twee condensatoren bestaat. Eenvoudigheidshalve nemen wij hier aan dat beide weerstanden de waarde r en beide capaciteiten de waarde C bezitten; dit is echter geenszins essentieel.

Zooals een eenvoudige berekening leert, geldt voor deze schakeling, bij de hoekfrequentie ω:

$$R = \frac{1-p^2}{1+7p^2+p^4}r, \quad X = \frac{-3p}{1+7p^2+p^4}r, \quad (7)$$

indien $p = \omega Cr$.

Is bijv. de gemiddelde steilheid van 5 mA/V aan variaties tot + en − 10% onderhevig, dan volgt uit (5) voor R de waarde −202 ohm. Uit (7) blijkt, dat, om negatieve waarden van R te kunnen realiseeren, p grooter dan 1 moet zijn. Kiest men bijv. $p = 2$ en is de frequentie van het te versterken signaal bijv. 1000 per/sec, dan volgt uit (7): $r = 3030$ ohm, $C = 0{,}105$ µF, $X = -404$ ohm. Daarbij wordt dan $S_{eff} = 2{,}5$ mA/V $\pm$ 0,064%, zoodat men, door slechts een factor 2 aan steilheid op te offeren, een enorme winst aan constantheid behaalt.

Men had ook de steilheid onveranderd kunnen laten, en wel door $|X| = 1/S$ te kiezen, dus $X = -200$ ohm. Uit (7) volgt dat men daarvoor $r = 4000$ ohm, $C = 0{,}131$ µF moet nemen. (6) leert dat het resultaat dan is: $S_{eff} = 5$ mA/V $\pm$ 0,25%, wat voor vele doeleinden nog zeer bevredigend is.

Winst in versterking kan men slechts boeken ten koste van de verbetering in constantheid. Zoo kan men in het zooeven besproken voorbeeld de gemiddelde steilheid tot bijv. het vijfvoudige, dus tot 25 mA/V, opvoeren door $X = -38{,}2$ ohm te kiezen, wat men bereikt met $r = 54\,500$ ohm, $C = 0{,}047$ µF (weer bij 1000 per/sec). Bij de onderstelde 10% variatie in S blijkt S_{eff} dan echter nog 6,3% te schommelen, zoodat in dit opzicht de verbetering niet noemenswaard is. Bij een nog iets verder opgevoerde positieve terugkoppeling zou S_{eff} zelfs in sterkere mate dan S gaan varieeren.

Bij de keuze van het terugkoppelnetwerk dient men er voor te zorgen dat geen oscilleeren kan optreden, hetgeen ongewenscht zou zijn. Is er nl. een frequentie waarvoor Z de waarde $-1/S$ aanneemt, dan zal de versterker in deze frequentie gaan oscilleeren.

Dit is als volgt in te zien. Men verbreekt in gedachten tijdelijk de verbindingen tusschen de uitgang van het terugkoppelnetwerk T en de ingang van de versterker A (*fig. 3*), bij afwezigheid van het te versterken signaal. Wordt nu aan de versterker een spanning V_{t1} toegevoerd, dan veroorzaakt deze een anodestroom $I_a = SV_{t1}$, welke op zijn beurt een spanning $V_{t2} = ZI_a = ZSV_{t1}$ aan de uitgang van het netwerk levert. De voorwaarde opdat $-V_{t2} = V_{t1}$ zij, is dus

$$ZS = -1 \quad (8)$$

Is hieraan voldaan, dan blijft, indien V_{t1} deze frequentie bezat, bij herstel der verbindingen tusschen T en A de toestand gehandhaafd; met andere woorden, de versterker oscilleert.

Met het terugkoppelnetwerk van fig. 2 bestaat geen gevaar voor oscilleeren. Aan de grensvoorwaarde voor oscilleeren $ZS = -1$ kan nl. alleen voldaan zijn, als Z reëel is (aangenomen dat S reëel is, wat gewoonlijk wel het geval is), dus als $X = 0$ is, hetgeen blijkens (7) slechts het geval is voor $\omega = 0$ en $\omega = \infty$ (bovendien is bij $\omega = 0$ volgens (7) R positief, nl. gelijk aan r, zoodat bij deze oplossing niet aan $ZS = -1$ kan worden voldaan).

[2]) Ter wille van de duidelijkheid zijn in fig. 2 en fig. 8 de bronnen van rooster- en anodespanning weggelaten.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Ten slotte zij er nog aan herinnerd dat door gebruik van tegenkoppeling de niet-lineaire vervorming kan afnemen [3]).

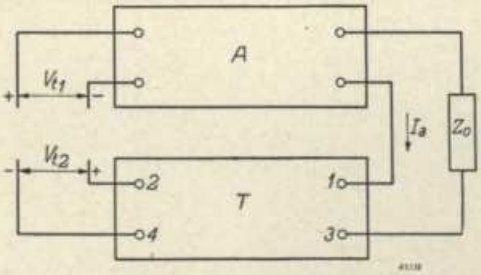


Fig. 3. Neemt voor een bepaalde frequentie de overdrachtsimpedantie $Z = V_{i2}/I_a$ van het terugkoppelnetwerk T de waarde $-1/S$ aan (verg. (8)), dan is de door T geleverde spanning juist identiek met de spanning die aan de ingang van de versterker A benoodigd is om V_{i2} voort te brengen. Bij aansluiten van de uitgang van T op de ingang van A gaat de versterker dan in deze frequentie oscilleeren.

Resumeerende komen wij tot de conclusie dat deze methode van terugkoppeling (tegenkoppeling) doeltreffend en eenvoudig is, dat weinig of geen versterking behoeft te worden opgeofferd, en dat zij tot vermindering der vervorming kan leiden. Men houde er echter rekening mee dat zoowel de versterking als de verbetering in constantheid functies der frequentie zijn, zoodat de methode in het algemeen minder geschikt is, indien het te versterken signaal een breede frequentieband beslaat. Voorts kan bij onjuiste uitvoering van het terugkoppelnetwerk hinderlijk oscilleeren optreden.

Ib) Toevoeging van een corrigeerend bedrag aan het uitgangssignaal

Deze methode komt in het kort hierop neer dat men de uitgangsspanning van een versterker door middel van bijv. een potentiometer of een transformator verkleint in een verhouding welke gelijk is aan de gewenschte versterking (die wij A_0 noemen), en de aldus verkregen fractie van de uitgangsspanning vergelijkt met de ingangsspanning. Ware de versterking juist A_0, dan zou deze fractie gelijk aan de ingangsspanning zijn. Een eventueel verschil wordt aan een afzonderlijke versterker toegevoerd, waarvan de versterking ook A_0 bedraagt. De combinatie van de uitgangsspanningen der beide versterkers levert nu een spanning die juist het A_0-voud van de ingangsspanning bedraagt.

Beschouwt men niet de afgegeven spanning, doch de anodestroom als uitgangssignaal, dan gaat men aldus te werk: uit de anodestroom I_{a1} van de hoofdversterker, waarvan de gewenschte steilheid S_0 bedraagt, leidt men met behulp van een overdrachtsimpedantie ter grootte $1/S_0$ een spanning af, die men met de ingangsspanning vergelijkt. Het verschil dat eventueel tusschen de beide spanningen bestaat, geeft in de anodekring van de hulpversterker (steilheid S_0) aanleiding tot een anodestroom I_{a2}. De som van de beide anodestroomen is juist S_0 maal de ingangsspanning.

Schematisch kunnen we dit als volgt aangeven: noemen we $S_0 \pm \Delta S$ de werkelijke steilheid van de hoofdversterker, dan levert dus

1) de ingangsspanning V_i, waarvan wij uitgaan,

2) in de hoofdversterker een anodestroom

$$I_{a1} = (S_0 \pm \Delta S) \cdot V_i.$$

3) Met behulp van een overdrachtsimpedantie $1/S_0$ leidt men hieruit af een spanning

$$\frac{S_0 \pm \Delta S}{S_0} V_i = \left(1 \pm \frac{\Delta S}{S_0}\right) V_i$$

4) en vergelijkt deze met de ingangsspanning. Het verschil is

$$\mp \frac{\Delta S}{S_0} V_i.$$

5) Dit verschil voert men toe aan de hulpversterker met steilheid S_0, die dus afgeeft de anodestroom

$$I_{a2} = \mp V_i \Delta S,$$

6) welke, gevoegd bij de anodestroom I_{a1} van de hoofdversterker, juist de gewenschte uitgangsstroom $S_0 V_i$ oplevert.

Men zal wellicht tegenwerpen dat nu de moeilijkheid slechts verschoven is naar het hulpkanaal, waarvan wij onderstelden dat de versterking A_0 resp. de steilheid S_0 bedraagt, doch welke waarden natuurlijk eveneens aan variaties onderhevig zijn. Men bedenke echter dat de hulpversterker slechts een correctie levert, zoodat eventueel er in optredende afwijkingen een geringe invloed op het eindresultaat hebben. Een getallenvoorbeeld zal dit onmiddellijk duidelijk maken.

Stel, men wenscht dat een signaal van 1 V een stroom van 100 mA teweeg brengt; de steilheid van het hoofdkanaal is toevallig echter slechts 95 mA/V. De uitgangsstroom van 95 mA leidt men door een overdrachtsimpedantie van 10 ohm, zoodat aan de uitgangsklemmen dezer impedantie een spanning van 0,95 V ontstaat. Het verschil hiervan met het oorspronkelijke signaal, dus 0,05 V, voert men toe aan de hulpversterker. Bezit deze een steilheid van juist 100 mA/V, dan levert hij exact de stroom

[3]) Zie bijv. de in noot [1]) aangehaalde artikelen.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

van 5 mA, die aan de uitgang van de hoofdversterker ontbrak, maar zou deze steilheid bijv. 90 of 110 mA/V bedragen, dan werd het eindresultaat 95 + (90 of 110)·0,05 = 99,5 resp. 100,5 mA. Een afwijking van 10% in de steilheid van de hulpversterker uit zich in dit geval dus als een fout van 0,5% in de totale versterking.

Deze eigenschap kan men, al naar de dimensionneering der koppelelementen, zoowel voor een smalle als voor een breede frequentieband verwezenlijken (dit in tegenstelling tot de vorige methode, die zich voor een groote bandbreedte niet zoo goed leent).

Het is gemakkelijk in te zien dat met deze tweede methode ook de niet-lineaire vervorming wordt tegengegaan. Een in de hoofdversterker door overbelasting afgesneden piek bijv. wordt door het hulpkanaal gesuppleerd.

Ook zal duidelijk zijn dat men desgewenscht een tweede, derde enz. hulpkanaal kan toepassen om grootere nauwkeurigheid te bereiken. *Fig. 4* geeft een voorbeeld van een schakeling met één hulpkanaal; voor bijzonderheden wordt naar het onderschrift verwezen. Op deze schakeling kan men tallooze variaties bedenken, waar wij hier niet op ingaan.

Sommen we weer in het kort de voor- en nadeelen van deze methode op, dan ziet de balans er als volgt uit:

Voordeelen: geen versterkingsverlies in het hoofdkanaal; sterk verminderde vervorming; geen kans op oscilleeren; geschikt voor een breede frequentieband.

Nadeelen: vergt eenige extra schakelelementen, waaronder ten minste één versterkbuis (waarbij men echter in aanmerking mag nemen dat het hulpkanaal voor een veel geringer vermogen gedimensionneerd kan worden dan de hoofdversterker).

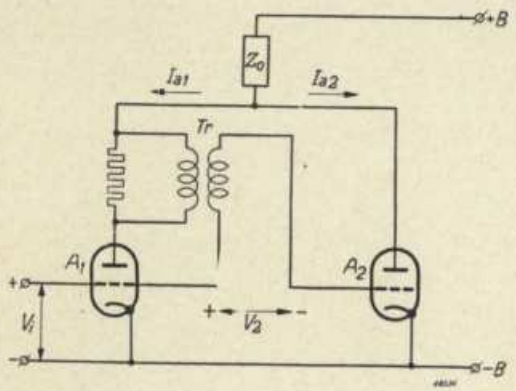


Fig. 4. De secundaire spanning V_2 van de transformator Tr is juist gelijk aan de ingangsspanning V_i, indien de steilheid van de hoofdversterkbuis A_1 de nominale waarde bezit. Wijkt deze steilheid hiervan af, dan ontstaat een verschil tusschen V_i en V_2, dat aan de hulpversterkbuis A_2 wordt toegevoerd. De steilheid van A_2 is zoodanig, dat de anodestroom I_{a2} juist het surplus of het ontbrekende in de anodestroom I_{a1} compenseert, zoodat de uitwendige impedantie Z_0 door een constante stroom doorloopen wordt. $+B$ = positieve, $-B$ = negatieve pool der anodespanningsbron.

IIa) Regeling van de steilheid met een afzonderlijk opgewekte hulpspanning

Bij deze groep van schakelingen wordt een hulpsignaal van niet-storende frequentie aan de versterker toegevoerd, tezamen met het hoofdsignaal.

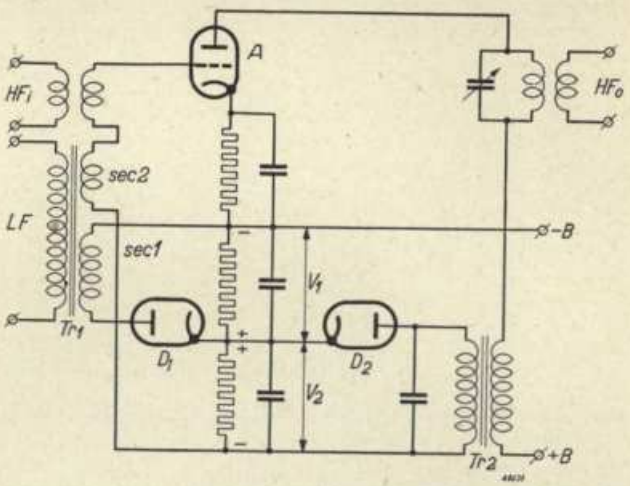


Fig. 5. Versterker voor hooge frequentie (ingang HF_i, uitgang HF_o), waaraan tegelijk een laagfrequent hulpsignaal LF wordt toegevoerd. De wikkeling *sec 1* op de transformator Tr_1 levert, gelijkgericht door de diode D_1, een spanning V_1, die in positieve zin op het stuurrooster van de versterkbuis A werkt. De spanning van wikkeling *sec 2* wordt meeversterkt en geeft via de op de lage frequentie afgestemde transformator Tr_2 en de diode D_2 een gelijkgerichte spanning V_2, die V_1 juist opheft, als de versterking de nominale waarde bezit. Wijkt deze echter hiervan af, dan treedt het verschil tusschen V_1 en V_2 als regelspanning op, die compenseerend werkt. $+B$, $-B$ = polen der anodespanningsbron.

Aan de uitgang wordt het hulpsignaal uitgezeefd, gelijkgericht en afgevlakt, en de aldus verkregen gelijkspanning, na aftrek van een vaste gelijkspanning, als regelspanning voor de versterkbuis of -buizen gebruikt.

In *fig. 5* is een schema van een versterkertrap voor hooge frequentie afgebeeld. Met HF_i zijn de ingangs-, met HF_o de uitgangsklemmen aangeduid. Een hulpspanning met lage frequentie wordt aan de transformator Tr_1 toegevoerd. De spanning van de wikkeling *sec 1* hiervan levert, gelijkgericht, de gelijkspanning V_1. De laagfrequente wisselspanning van de wikkeling *sec 2* wordt met het hoogfrequente signaal mee versterkt en levert, via de afgestemde transformator Tr_2 en gelijkgericht door de diode D_2, de gelijkspanning V_2.

De gelijkspanningen V_1 en V_2 zijn beide in de stuurroosterketen van de buis A opgenomen, en wel zoodanig dat V_1 voor het rooster in positieve, V_2 in negatieve zin werkt. De verhouding der wisselspanningen van *sec 1* en *sec 2* en de transformatie-

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

verhouding van Tr_2 zijn zoodanig gekozen, dat V_1 en V_2 elkaar compenseeren, indien de steilheid van A de juiste waarde bezit. Zou deze steilheid echter kleiner worden, dan daalt V_2, zoodat de stuurroosterspanning van A minder negatief wordt en de buis komt te werken in een deel der karakteristiek waar de steilheid grooter is; bij toenemende steilheid gebeurt het omgekeerde. Iedere afwijking van de normale steilheid wordt aldus automatisch althans ten deele gecorrigeerd.

Eventueele variaties in de amplitude van het laagfrequente ingangssignaal beïnvloeden V_1 en V_2 in dezelfde mate en zijn daardoor onschadelijk.

Het ligt voor de hand, het laagfrequente hulpsignaal van het wisselstroomnet te betrekken, dat de versterker voedt. Dit is echter om de volgende reden minder gewenscht: wegens de zeer lage frequentie van dit net heeft men groote capaciteiten noodig om de spanningen V_1 en V_2 voldoende af te vlakken; dit veroorzaakt een zoodanige traagheid in de werking, dat de regeling plotselinge veranderingen in de netspanning niet snel genoeg kan volgen, zoodat tijdelijk groote afwijkingen van de nominale versterking kunnen ontstaan. Daarom past men liever een hulpsignaal met hoogere frequentie, bijv. van de orde van 1000 per/sec, toe. Het nadeel dat men dit afzonderlijk moet opwekken, is ondervangen bij de volgende methode, waarbij de versterker zelf deze hulpspanning voortbrengt.

IIb) Regeling van de steilheid met een in de versterker opgewekte hulpspanning

Het is na de schakeling van fig. 5 slechts een kleine stap tot de veel elegantere oplossing, de versterker zelf in de gewenschte, niet storende hulpfrequentie te doen oscilleeren. Hiertoe moet een aan de uitgang ontleend signaal via een overdrachtsimpedantie naar de ingang teruggevoerd worden, evenals boven bij Ia) besproken werd, echter met dit verschil dat daar het teruggevoerde signaal de frequentie van het te versterken signaal heeft en het geheel niet mag oscilleeren, terwijl in het onderhavige geval de versterker wel oscilleert, met een frequentie die bij voorkeur een andere is dan die van het te versterken signaal. In deze toestand van oscilleeren geldt

$$SZ = -1, \quad \ldots\ldots\ldots \quad (8)$$

zoodat hierdoor de steilheid S is vastgelegd, daar zij gelijk moet zijn aan een gegeven admittantie $-1/Z$. Indien men dus slechts deze admittantie heeft gekozen gelijk aan de gewenschte waarde der steilheid, dan bewijst het optreden van oscilleeren dat de steilheid deze waarde inderdaad bezit. Afwijkingen van deze waarde worden weer door een regelspanning gecorrigeerd. Moest bij de methode IIa) deze regelspanning ontleend worden aan de versterkte hulpspanning door vergelijking met een vaste spanning, hier wordt de gelijkgerichte oscillatiespanning zelf als regelspanning gebruikt. Hieraan is te danken dat nu kleinere hulpspanningen gebruikt kunnen worden, zoodat modulatie van het hulpsignaal op het hoogfrequente signaal, die bij de schakeling van fig. 5 steeds min of meer optreedt, hier veel zwakker zal zijn. Ook kan de schakeling veel eenvoudiger worden, zooals aanstonds zal blijken.

De vraag kan nu rijzen, of men op deze wijze een exact constante versterking bereikt. Dit zou inderdaad het geval zijn, indien S niet van de signaalamplitude afhing, met andere woorden indien de buiskarakteristiek in het werkgebied volkomen lineair was. In werkelijkheid is zij min of meer gekromd; de grootheid S in (8) is dan een soort gemiddelde steilheid van het doorloopen gedeelte der karakteristiek, en derhalve min of meer van de amplitude afhankelijk. In zooverre is de verkregen versterking niet volkomen constant; bij kleine amplituden zullen de afwijkingen echter zeer gering zijn.

In het geval van een volkomen of nagenoeg rechte karakteristiek heeft een regelspanning op het stuurrooster uiteraard geen of bijna geen effect; de steilheid is immers (nagenoeg) onafhankelijk van de voorspanning op het stuurrooster. Wel is de steilheid te beïnvloeden door een gelijkspanning op het derde rooster („vangrooster") van de buis — die dan een penthode moet zijn — te varieeren. De regelspanning dient men dus in zoo'n geval aan het vangrooster toe te voeren.

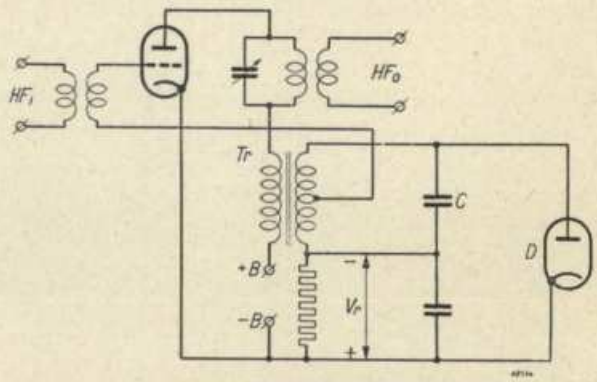


Fig. 6. Versterker voor hooge frequentie (ingang HF_i, uitgang HF_o), analoog aan die van fig. 5, echter met dit verschil dat nu het laagfrequente hulpsignaal in de versterker zelf wordt opgewekt (trillingskring met terugkoppeling, bestaande uit de transformator Tr en de condensator C). De laagfrequente spanning wordt door een diode D gelijkgericht en vormt dan rechtstreeks de regelspanning V_r, met behulp waarvan steilheidsafwijkingen gecompenseerd worden. $+B$, $-B$ = polen der anodespanningsbron.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Wij zullen nu enkele voorbeelden geven van schakelingen waarin deze methode is toegepast. In *fig. 6* zijn weer met HF_i en HF_o de ingangs- resp. uitgangsklemmen van het signaal met hooge frequentie aangegeven. Van de transformator *Tr* is de primaire spoel in de anodeketen van een versterkbuis opgenomen, terwijl de secundaire spoel er van met de condensator *C* een laagfrequente trillingskring vormt; een gedeelte van de hieraan optredende wisselspanning wordt naar het stuurrooster teruggevoerd, waardoor de benoodigde terugkoppeling tot stand komt. De laagfrequente spanning wordt door de diode *D* gelijkgericht tot de regelgelijkspanning V_r, die, in negatieve zin op het stuurrooster werkend, een corrigeerende invloed uitoefent. Vergelijking van fig. 6 met fig. 5 laat zien dat de eerstgenoemde eenvoudiger is.

Wenscht men de hulpwisselspanning in de versterkbuis bijzonder klein te houden, ten einde de modulatie er van op het hoogfrequente signaal nog verder te verminderen, dan kan men de oscillatiespanning met een afzonderlijke buis versterken, alvorens men er een regelspanning uit afleidt. Hiervan geeft *fig. 7* een voorbeeld, dat in het onderschrift is toegelicht.

Zooals boven reeds ter sprake kwam, is het, om een schakeling in een bepaalde frequentie te doen oscilleeren, noodig dat naar de ingang een spanning met de juiste fase en amplitude wordt teruggevoerd. Het is in het geheel niet noodig dat dit via trillingskringen gebeurt; geschikt gekozen terugkoppelnetwerken, slechts bestaande uit weerstanden en capaciteiten of uit weerstanden en zelfinducties (*RC*- resp. *RL*-netwerken) kunnen evenzeer dienst doen. Vooral bij lage frequenties, waar men met trillingskringen in het gebruik van groote en dure spoelen zou vervallen, kan een *RC*-netwerk veel voordeeliger zijn. Sommige dezer schakelingen zijn bekend als generatoren van spanningen met rechthoekige of andere niet-sinuso dale krommevorm, zooals de multivibrator van Abraham en Bloch. Minder bekend is evenwel, dat, indien men in deze schakelingen de amplitude maar op de juiste wijze begrenst, de trillingen nagenoeg sinusvormig blijven. Zij zijn dan zeer goed bruikbaar om op de zooeven beschreven wijze de steilheid van een versterker vast te leggen.

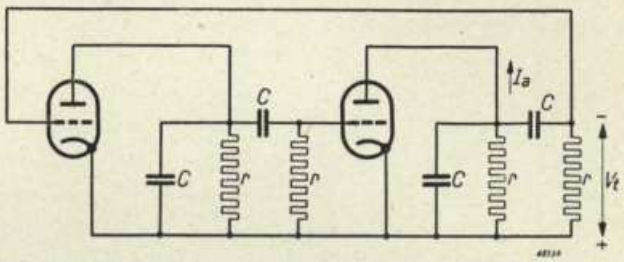


Fig. 8. Voorbeeld van een schakeling (zie noot [2])) zonder trillingskring, die niettemin kan oscilleeren (zg. „*RC*-generator").

Uit de vele bruikbare schakelingen geeft *fig. 8* een eenvoudig voorbeeld (zie noot [2])). Het verschil met fig. 2 bestaat slechts hierin dat de meest linksche weerstand en condensator van fig. 2 van plaats verwisseld zijn, en dat twee trappen in cascade zijn geschakeld (met slechts één trap zou de spanning V_t juist 180° in fase moeten worden verschoven om oscilleeren mogelijk te maken). Voor de overdrachtsimpedantie $Z = V_t/I_a$ geldt in fig. 8:

$$Z = \frac{-3p^2 + jp(1-p^2)}{1 + 7p^2 + p^4} \cdot r, \quad . \quad . \quad . \quad (9)$$

indien weer p wordt geschreven voor ωCr. Zooals men ziet, kan nu Z reëel worden gemaakt voor

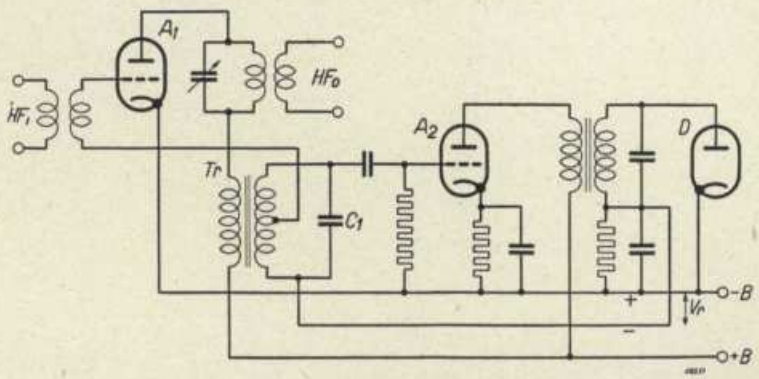


Fig. 7. Variant op de schakeling van fig. 6. Het in de trillingskring Tr-C_1 opgewekte hulpsignaal met lage frequentie wordt versterkt door de hulpbuis A_2, alvorens de diode *D* het tot de regelspanning V_r gelijkricht. Het voordeel hiervan is dat nu de amplitude der spanning aan de kring Tr-C_1, benevens de daarvan aan het stuurrooster van de hoofdbuis A_1 toegevoerde fractie, zeer klein gehouden kunnen worden, met overeenkomstig verminderde kans op modulatie van het laagfrequente op het hoogfrequente signaal. $+B$, $-B$ = polen der anodespanningsbron.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

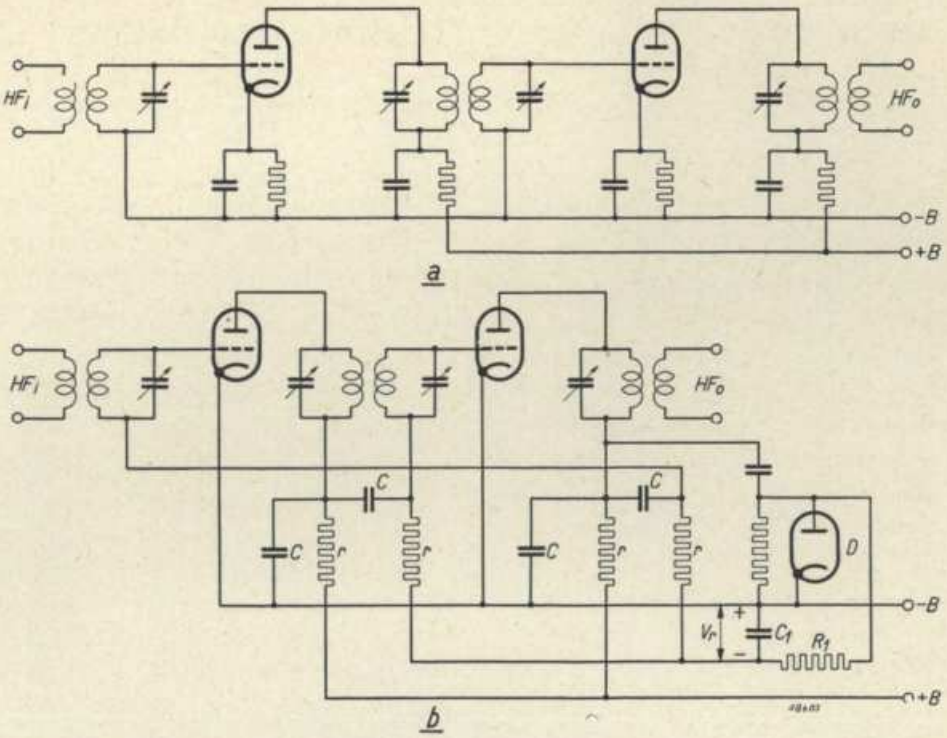


Fig. 9. Versterker voor hooge frequentie, bestaande uit twee trappen, *a*) zonder, *b*) met constant gehouden versterking. In dit laatste geval werkt de versterker als „*RC*-generator" volgens het principe van fig. 8 en brengt aldus zelf de benoodigde laagfrequente hulpspanning voort. Door middel van de diode *D* en de afvlakketen R_1-C_1 wordt hieruit een negatieve roosterspanning V_r afgeleid, die zoowel regelend werkt als de functie heeft van amplitude-begrenzer. HF_i = ingang, HF_o = uitgang van het hoogfrequente signaal. $+B$, $-B$ = polen der anodespanningsbron. De met r en C aangegeven weerstanden en condensatoren vormen *RC*-netwerken analoog aan die in fig. 8.

$p = 1$, waarvoor Z de waarde $-r/3$ aanneemt. Oscilleeren zal dus optreden, indien $S = 3/r$, en wel met de frequentie $f = 1/2\pi Cr$.

Indien de schakeling inderdaad oscilleert, kan men omgekeerd hieruit concludeeren dat de steilheid $S = 3/r$ is en derhalve door de weerstandswaarde r is vastgelegd.

Het begrenzen van de amplitude kan op eenvoudige wijze geschieden door de voortgebrachte wisselspanning gelijk te richten en af te vlakken en de aldus verkregen gelijkspanning (of een deel hiervan) als negatieve roosterspanning voor de oscilleerende versterkbuis te gebruiken. Men vindt dit toegepast in de tweetraps-versterker voor hooge frequentie van *fig. 9b* (volgens het principe van fig. 8). Vergelijking met fig. 9*a*, die dezelfde versterker zonder constant gehouden versterking toont, doet zien dat voor het constant houden slechts enkele, weinig kostbare onderdeelen noodig zijn. Aan de mate van versterking behoeft hier niets te worden opgeofferd.

Tot slot zij de aandacht gevestigd op de mogelijkheid, twee of meer der besproken methoden te combineeren, waardoor de mate van constantheid der versterking buitengewoon hoog kan worden opgevoerd.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

OVERZICHT VAN RECENTE WETENSCHAPPELIJKE PUBLICATIES DER N.V. PHILIPS' GLOEILAMPENFABRIEKEN

Van deze publicaties verstrekt de Administratie van het Natuurkundig Laboratorium, Kastanjelaan, Eindhoven, op aanvrage gratis overdrukken. Van de publicaties die met een sterretje * zijn gemerkt, is echter geen voor verspreiding voldoende aantal overdrukken beschikbaar.

1690: N. W. H. Addink: Complete and incomplete crystals (Nature **157**, 764, 1946).

De schrijver vereenigt in een tabel de volgens hem meest betrouwbare waarden van N (getal van Avogadro), afgeleid uit de dichtheid en röntgenografische bepaling van de elementaire cel, voor een aantal kristallen (diamant, KCl, SiO_2, $CaCO_3$, PbO, Sn, diverse andere metalen). Het blijkt dat N in de genoemde volgorde toeneemt, hetgeen vermoedelijk in verband staat met afwijkingen van de dichtheid van de ideale waarde. Voor deze afwijkingen wordt de term „incompleteness" (onvolmaaktheid) voorgesteld. De waarde van N (chemische schaal) voor diamant $(6{,}0227^5 \pm 0{,}0003) \cdot 10^{23}$ ligt dicht bij die van Birge (1941) voor calciet $(6{,}0228^3 \pm 0{,}0011) \cdot 10^{23}$.

1691: Balth. van der Pol: The fundamental principles of frequency modulation (J. Inst. El. Eng. **93**, 153-158, 1946).

Lezing voor de afd. Radio van het I.E.E., waarin de schrijver de volgende problemen behandelt:

1) het verband tusschen stroom en spanning in een trillingskring waarvan de grootheden L, C, r en R (condensatorlek) gegeven functies zijn van de tijd;
2) de reactie van een gegeven netwerk op een frequentiegemoduleerd signaal, waardoor de distorsie van zulke signalen bij doorgang door lineaire netwerken kan worden beheerscht. Bovendien wordt de definitie van de begrippen amplitude, fase en frequentie besproken.

1692: A. Claassen and J. Visser: The determination of uranium with o-oxyquinoline (Rec. Trav. chim. Pays-Bas **65**, 211-215, 1946).

De methode van Hecht en Reich-Rohwig voor de bepaling van uranium door middel van o-oxychinoline werd critisch onderzocht. Aanbevolen wordt om het precipitaat in plaats van met heet water, met een 0,04% oxine-oplossing te wasschen. De precipitatie is volledig in het p_H-gebied 5,0-9,0. Nauwkeurigheid: 0,1%, volledige scheiding van magnesium, aardalkali- en alkalimetalen.

1693: J. M. Stevels: Chemische binding en reactiviteit van eenvoudige organische verbindingen (Chem. Weekblad **42**, 150-154, 1946).

Aan de hand van experimenteele gegevens wordt aangetoond, dat, althans bij de gehalogeneerde methaanderivaten, de volgende eigenschappen van de koolstof-halogeen binding samengaan: sterkere binding, grootere dissociatie-energie, grootere activeeringsenergie en grooter botsingsgetal in de reactie met Na in de gasfase, kleinere bindingsrefractie, grootere krachtconstante der trilling C-X. Bij uitbreiding tot onverzadigde verbindingen kan hieraan worden toegevoegd: sterker „double bound character", kleinere atoomafstand.

Het laatst verschenen nummer van *Philips Research Reports* (No. 5 van jaargang 1, November 1946) bevat de volgende artikelen:

R22: A. A. Padmos: Checking the thermal expansion of glasses and metals by stress-optical tests.

R23: J. L. H. Jonker: The control of the current distribution in electron tubes.

R24: W. Elenbaas: Similarity of high-pressure discharges of the convection stabilized type.

R25: M. Gevers: The relation between the power factor and the temperature coefficient of the dielectric constant of solid dielectrics IV.

R26: A. van der Ziel: Theory of grounded grid anplifiers.

Degenen die voor een der bovenvermelde artikelen belangstelling hebben, kunnen zich wenden tot de Administratie van het Natuurkundig Laboratorium, Kastanjelaan, Eindhoven, waar een beperkt aantal overdrukken voor gratis verspreiding ter beschikking is.

Voor een abonnement op Philips Research Reports wende men zich tot den uitgever van het Philips Technisch Tijdschrift.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!